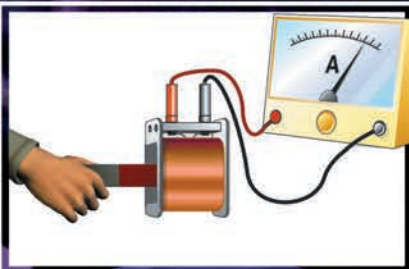
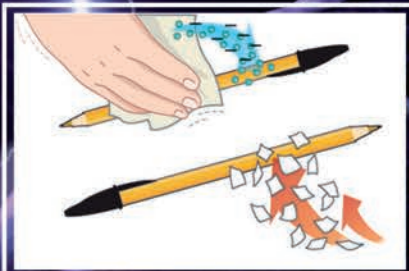
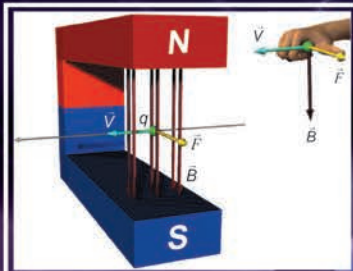


Electromagnetismo

Bachillerato universitario



José Alberto Alvarado Lemus
Pablo Valdés Castro
José Bibiano Varela Nájera



Dr. José Alberto Alvarado Lemus
Dr. Pablo Valdés Castro
Dr. José Bibiano Varela Nájera

Electromagnetismo

Bachillerato universitario

Prohibida la reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio, sin autorización escrita del autor.

Electromagnetismo

Bachillerato universitario

Dr. José Alberto Alvarado Lemus
Dr. Pablo Valdés Castro
Dr. José Bibiano Varela Nájera

Diseño de Portada: Dr. José Alberto Alvarado Lemus
Diseño de interiores: Dr. José Alberto Alvarado Lemus
Revisión Técnica: Dr. José Bibiano Varela Nájera

Primera edición, 2009
Segunda edición, 2011

Once Ríos Editores
Río Usumacinta 821 Col. Industrial Bravo
Culiacán, Sinaloa, México

2000 ejemplares
Impreso en México
Printed in Mexico

ÍNDICE

Electricidad y su naturaleza

1.1. Introducción.	13
1.1.1 Importancia de la electricidad.	17
1.2.2 Noción de circuito eléctrico.	18
1.2. Electrostática.	21
1.2.1. Electrización de los cuerpos.	21
1.2.2. Naturaleza de la electricidad.	26
1.2.3. Cargas eléctricas.	32
1.2.4. Ley de Coulomb.	36
1.2.4.1. Unidad de carga eléctrica	39
1.2.5. Campo eléctrico.	48
1.2.5.1. Intensidad de campo eléctrico.	49
1.2.5.2. Intensidad de campo eléctrico de una partícula con carga.	52
1.2.5.3. Líneas de campo eléctrico.	55
1.2.6. Potencial y diferencia de potencial.	60
1.2.6.1. Energía potencial eléctrica.	60
1.2.6.2. Potencial eléctrico.	64
1.2.6.3. Diferencia de potencial.	64
1.2.7. Conductores y dieléctricos en un campo electrostático.	67
1.2.7.1. Conductores en un campo electrostático.	67
1.2.7.2. Aisladores en un campo electrostático.	70
1.2.7.2.1. Dieléctricos polares.	70
1.2.7.2.2. Dieléctricos no polares.	71
1.2.8. Capacidad eléctrica y condensadores.	73
1.2.9. Energía del campo eléctrico.	79
1.3. Actividades de sistematización y consolidación.	83
1.3.1. Sopa de letras.	83
1.3.2. Conexión de conceptos e ideas.	84
1.3.3. Crucigrama.	85
1.3.4. Actividades de repaso.	86
1.3.5. Ejercicios de repaso.	89

Corriente eléctrica y circuitos

2.1. Corriente eléctrica.	95
2.1.1. Naturaleza de la corriente eléctrica y condiciones para que exista.	95
2.1.2. Efectos de la corriente eléctrica.	101
2.1.3. Sentido de la corriente, corrientes directa y alterna.	103
2.1.3.1. Corriente directa y corriente alterna.	105
2.1.4. Magnitudes básicas en los circuitos eléctricos: intensidad de corriente, voltaje, potencia y fuerza electromotriz.	106
2.1.4.1. Intensidad de corriente.	106
2.1.4.2. Diferencia de potencial o voltaje.	110
2.1.4.3. Potencial eléctrico.	113
2.1.4.4. Fuerza electromotriz.	119
2.2. Corriente eléctrica en diversos medios.	121
2.2.1. Corriente eléctrica en los metales. Ley de Ohm.	121
2.2.2. Corriente eléctrica en los electrolitos.	128
2.2.3. Corriente eléctrica en los gases.	133
2.2.4. Corriente eléctrica en los semiconductores.	135
2.3. Funcionamiento de circuitos eléctricos simples.	143
2.3.1. Conexiones en serie y en paralelo.	143
2.3.2. Dispositivos de control.	149
2.3.3. Acoplamiento de circuitos eléctricos simples.	152
2.3.4. Medición y ahorro de la energía eléctrica.	153
2.4. Actividades de sistematización y consolidación.	156
2.4.1. Sopa de letras.	156
2.4.2. Conexión de conceptos e ideas.	157
2.4.3. Crucigrama.	158
2.4.4. Actividades de repaso.	159
2.4.5. Ejercicios de repaso.	161

Magnetismo

3.1. Imanes e interacciones magnéticas.	169
3.2. Campo magnético.	171
3.3. Corriente eléctrica y magnetismo.	174
3.4. Fuerza de Ampere	179
3.5. Fuerza de Lorentz.	188
3.6. Materiales magnéticos y estructura interna.	194
3.7. Utilización práctica del efecto magnético de la corriente eléctrica	197
3.7.1. Motor eléctrico de corriente directa.	197
3.7.2. Bocina electrodinámica.	201
3.7.3. Grabación magnética.	202
3.8. Actividades de sistematización y consolidación.	204
3.8.1. Sopa de letras.	204
3.8.2. Conexión de conceptos e ideas.	205
3.8.3. Crucigrama.	206
3.8.4. Actividades de repaso.	207
3.8.5. Ejercicios de repaso.	208

Inducción electromagnética

4.1. Experiencias de inducción electromagnética.	213
4.2. Ley de la inducción electromagnética.	218
4.2.1. Flujo de campo magnético.	218
4.2.2. Ley de Faraday de la inducción electromagnética.	221
4. 3. Campo eléctrico rotacional.	226
4.4. Inducción electromagnética debida al movimiento de un conductor en un campo magnético.	229
4.5. Utilización práctica de la inducción electromagnética.	233
4.5.1. Generador de inducción electromagnética.	233
4.5.2. Transformador.	236
4.5.3. Lectura de información grabada en materiales magnéticos.	238
4.6. Autoinducción e Inductancia.	239
4.7. Energía del campo magnético	242
4.8. Ondas electromagnéticas y sus aplicaciones.	244
4.9. Actividades de sistematización y consolidación.	247
4.9.1. Sopa de letras.	247
4.9.2. Conexión de conceptos e ideas.	248
4.9.3. Crucigrama.	249
4.9.4. Actividades de repaso.	250
4.9.5. Ejercicios de repaso.	253

Actividades prácticas

5.1. Actividades para la casa o el aula.	257
5.2. Prácticas de laboratorio.	266
5.2.1. Característica voltampérica de un resistor. Ley de Ohm.	267
5.2.2. Característica voltampérica del filamento de un bombillo.	269
5.2.3. Medición de la fem y la resistencia interna de una fuente de energía eléctrica.	271
5.2.4. Medición de la carga del electrón.	275
5.2.5. Conexión de conductores en serie y en paralelo. Acoplamiento de circuitos simples.	278
5.2.6. Interacción de un campo magnético y un conductor con corriente: experimento de Oersted, fuerza de Ampere.	282
5.2.7. Estudio del fenómeno de inducción electromagnética.	285

A estudiantes y profesores

Este libro, *Electromagnetismo*, forma parte de los materiales curriculares preparados para apoyar la introducción del *Plan 2006* en el bachillerato de la Universidad Autónoma de Sinaloa. El Electromagnetismo apareció y se consolidó como rama de la ciencia en el siglo XIX y se ha convertido en un factor decisivo del desarrollo tecnológico y social. Para percatarse de lo que representa, basta pensar qué sería de nuestras vidas, si de pronto desapareciese la posibilidad de utilizar la electricidad.

Durante el estudio de esta asignatura, los alumnos amplían la visión del mundo que poseen, en particular, se familiarizan con una de las cuatro interacciones fundamentales de la naturaleza, se relacionan con el concepto de campo, explican diversos fenómenos del mundo que los rodea, analizan el principio físico básico del funcionamiento de numerosos dispositivos y equipos utilizados en la tecnología y la vida diaria. Su estudio contribuye, pues, a ampliar la cultura general básica de los alumnos y a prepararlos para continuar carreras universitarias de diversos perfiles.

El enfoque didáctico del libro es consecuente con la tarea en que actualmente está enfrascada la Universidad Autónoma de Sinaloa, de reestructurar el currículo del bachillerato en base a *competencias*. De ahí que en la siguiente página relacionemos las competencias que se esperan lograr, o contribuir a lograr, en los alumnos.

Pero tan importante, o más, que declarar esas competencias, es que los alumnos realicen un sistema de actividades especialmente concebidas para alcanzarlas. Por eso, a lo largo del libro y acompañando al texto, se ha incluido un gran número de preguntas, actividades a realizar y ejercicios resueltos. Luego, al final de cada capítulo, aparece otra serie de actividades que complementan a las anteriores y ayudan a consolidar y sistematizar el material estudiado. Se incluye además un apartado dedicado a actividades prácticas, el cual debe facilitar la labor de los maestros en esa dirección, y ayudar así a revitalizar un aspecto esencial de la formación de los alumnos, lamentablemente descuidado en los últimos años. La idea central es que el libro sea, más allá de un *libro de texto*, un *material de trabajo*, pues solo reflexionando profundamente sobre lo leído, planteándose interrogantes y realizando numerosas actividades teóricas y prácticas alrededor del material, es decir, trabajando conscientemente, podrán los alumnos adquirir las competencias que se esperan.

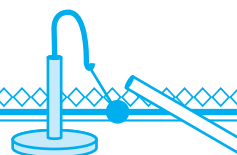
Por último, nos parece necesario subrayar, que realizar con efectividad un enfoque del proceso de enseñanza-aprendizaje basado en la formación de competencias, no será posible si dicho proceso no es acompañado por un sistema de evaluación que esté en correspondencia con las competencias declaradas y las actividades desarrolladas.

Los autores

1

Electricidad y su naturaleza





1.1. Introducción

Como ya sabes, la Física estudia **sistemas** y **cambios fundamentales**, que están en la base de sistemas y cambios más complejos, considerados por diversas ramas de la ciencia y la tecnología. Durante el estudio de la **Mecánica** examinaste uno de esos cambios, el **movimiento mecánico**. En este curso centraremos la atención en otra importante parte de la Física, denominada **Electromagnetismo**. Como sugiere este término, se trata de una rama que examina los fenómenos eléctricos y magnéticos y la vinculación entre ellos.

Por ahora pudieras decirlo así, pero tendrás una imagen más clara cuando estudiemos las características de esta interacción y algunos de los fenómenos que origina.

Los fenómenos estudiados por el Electromagnetismo son originados por la **interacción electromagnética**. Por su relevancia en la vida de los seres humanos, ésta ocupa un lugar destacado entre las cuatro interacciones fundamentales consideradas por la Física: gravitatoria, electromagnética, nuclear fuerte y débil.

Las interacciones fuerte y débil son las responsables de fenómenos que ocurren a escalas muy pequeñas, actúan solo a distancias inferiores a 10^{-15} m. La gravitatoria determina la estructura de sistemas, y procesos, a escala astronómicas; para nosotros tiene particular interés la interacción gravitatoria entre la Tierra y los cuerpos en su superficie. Por su parte, la interacción electromagnética es la responsable de la integridad de átomos, moléculas y de todos los cuerpos con los cuales nos relacionamos.

Con excepción de la fuerza de gravedad, el resto de las fuerzas con que tenemos que ver en la vida diaria y la ingeniería —la fuerza ejercida por nuestros músculos, las fuerzas de rozamiento y elástica, las tensiones en cuerdas y alambres— son manifestaciones de la interacción electromagnética (Fig. 1.1). Ella también hace posible la visión,

Entonces puede decirse que el Electromagnetismo es la rama de la ciencia que estudia aquellos fenómenos originados por la interacción electromagnética.



ya que la luz es un fenómeno electromagnético. Incluso la vida misma sería imposible sin su acción. Como han mostrado los vuelos cósmicos (Fig. 1.2), los seres vivos, entre ellos los humanos, pueden pasar largos períodos sin estar sometidos a la acción gravitatoria, sin embargo, si por solo un instante desapareciera la interacción electromagnética, cesaría la vida.



Fig. 1.1. Con excepción de la fuerza de gravedad, el resto de las fuerzas en la situación de la figura tiene un origen electromagnético: la acción de la persona y la maleta sobre el piso y la de éste sobre ellos, la tensión de la cuerda, la interacción de ésta con la maleta y la mano de la persona. Por supuesto, la integridad como cuerpos, tanto de la maleta como de la persona, también se debe a la interacción electromagnética.

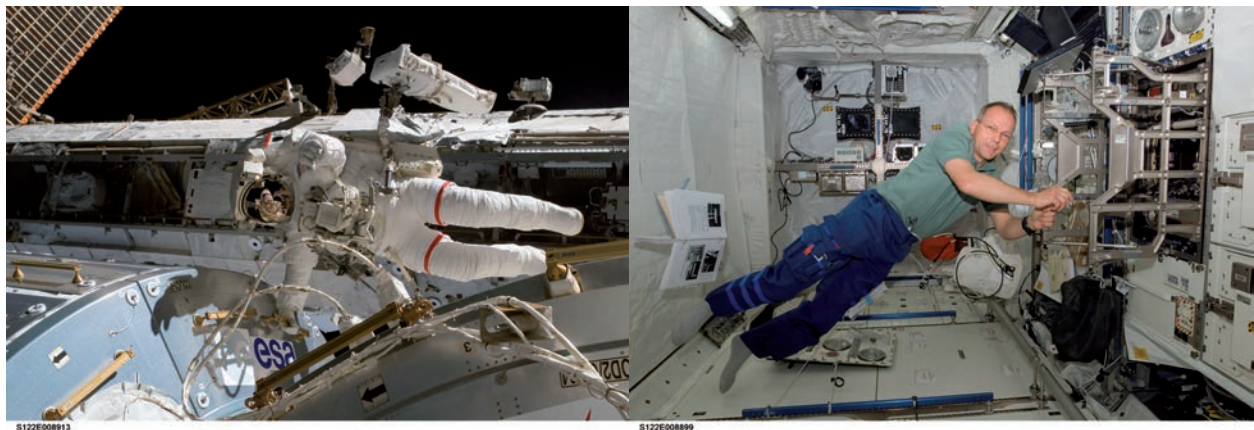
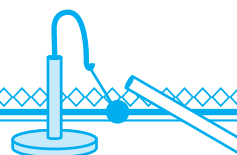


Fig. 1.2. Los seres vivos, entre ellos los humanos, pueden pasar largos períodos sin estar sometidos a la interacción gravitatoria, pero si por solo un instante desapareciera la interacción electromagnética, cesaría la vida.



Explica con tus propias palabras por qué en el texto se dice que con excepción de la fuerza de gravedad, el resto de las fuerzas con que tenemos que ver habitualmente son manifestaciones de la interacción electromagnética.

Entre los sistemas en que los fenómenos electromagnéticos resultan esenciales están no solo los naturales. Después de construirse los primeros generadores de electricidad, especialmente las centrales eléctricas en la década de 1880, comenzaron a diseñarse y crearse ininidad de dispositivos y equipos cuyo funcionamiento se basa en los fenómenos electromagnéticos. Comparada con la historia de la humanidad, la historia de estos desarrollos tecnológicos es muy corta, data de apenas dos siglos, pero el impacto que han tenido en nuestro modo de vida y en el desarrollo de la ciencia y la tecnología ha sido colosal. Para percatarnos de esto, basta pensar qué sería de nuestra actividad diaria y en general de la actividad de la sociedad, si de pronto desapareciese la posibilidad de utilizar la electricidad. Por otra parte, se ha llegado a afirmar que la ciencia y la tecnología avanzaron más durante el pasado siglo que en todo su desarrollo anterior, e indudablemente esto fue posible, en gran medida, gracias a los descubrimientos e invenciones relacionados con el Electromagnetismo.

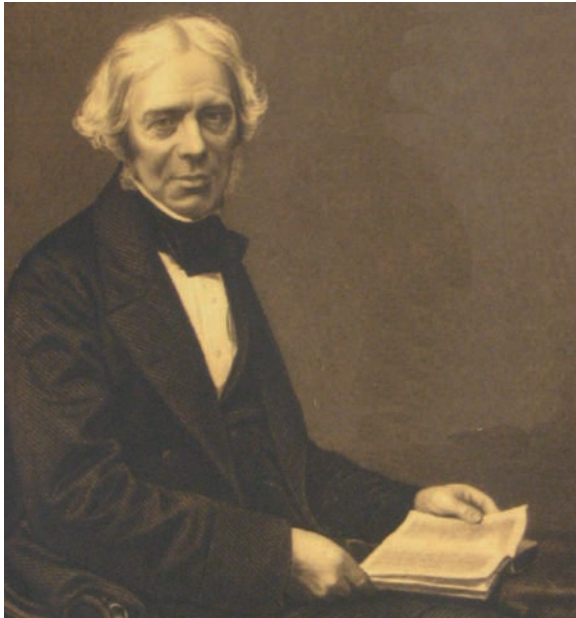


Relaciona sistemas, naturales y creados por el hombre, en que los fenómenos electromagnéticos son determinantes.





Al establecimiento del Electromagnetismo como rama de la ciencia contribuyó una larga cadena de descubrimientos e investigaciones, que comenzó con el simple hallazgo realizado en la antigüedad de que al frotar ámbar éste atraía objetos muy ligeros, y culminó en el siglo XIX con la predicción de la existencia de las ondas electromagnéticas y la generación de ellas en un laboratorio. Fueron muchos los protagonistas de esta historia, pero entre ellos sobresalen Michael Faraday y James C. Maxwell. Las “ecuaciones de Maxwell” desempeñan un papel similar en el Electromagnetismo, que las “Leyes de Newton” en la Mecánica clásica. Con ellas trabajarás de modo formal en la universidad, pues requieren conocimientos de Matemática Superior.

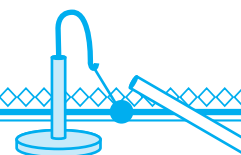


Michael Faraday (1791-1867). Físico y químico británico, introdujo las nociones de campo eléctrico y campo magnético y formuló la ley de inducción electromagnética, fundamento de los generadores y de los transformadores, también halló las leyes de la electrólisis.



James C. Maxwell (1831-1879). Físico británico, introdujo en la Física la interpretación estadística de los fenómenos, la que aplicó al estudio de los gases. Sintetizó las leyes fundamentales del Electromagnetismo en cuatro ecuaciones que en su honor hoy llevan su nombre.

En esta unidad comenzaremos examinando la electricidad, su importancia y naturaleza. En las siguientes abordaremos la corriente eléctrica y el funcionamiento de algunos circuitos simples, el magnetismo y varias de sus aplicaciones. En la última unidad estudiaremos la estrecha relación entre electricidad y magnetismo, así como el principio de funcionamiento de algunos dispositivos.



1.1.1. Importancia de la electricidad

El verdadero desarrollo de la Electricidad tuvo lugar a partir del año 1800, después que el físico italiano Alessandro Volta (1745-1827) inventara la primera **pila eléctrica**. Desde entonces y hasta nuestros días, década tras décadas se han realizado importantes invenciones vinculadas al Electromagnetismo, que como ya señalamos, han cambiado el modo de vida de los seres humanos. Así, en la década del 70 del siglo XIX se fabricaron las primeras lámparas incandescentes y en los 80 empezaron a utilizarse pequeñas centrales eléctricas para la iluminación. La radio, la televisión, las computadoras e Internet, que han representado hitos en el desarrollo de las comunicaciones, fueron creadas a lo largo del siglo XX. El análisis de la tabla 1.1 te permite recorrer las fechas de algunas importantes invenciones vinculadas al Electromagnetismo. Todas ellas basan su funcionamiento en la **generación y utilización de electricidad**.

Vincula las fechas de las invenciones relacionadas en la tabla 1.1, con la época en que tuvieron lugar importantes hechos de la historia universal y de México.

Indagacuándocomenzaron a utilizarse en México: a) el teléfono, b) las primeras lámparas de filamento incandescente, c) el radio, d) la televisión.

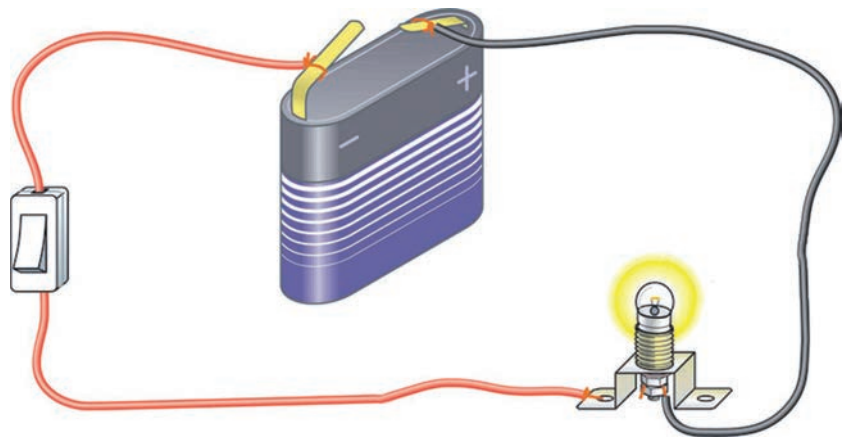


Tabla 1.1. Algunas invenciones vinculadas a la electricidad.

Pila eléctrica, 1800	Primer servicio público de televisión, 1936
Arco eléctrico, 1801 (comercializado en 1858)	Primera computadora digital electrónica, 1945
Motor eléctrico efectivo, 1829	Horno microonda, 1945-1949
Timbre eléctrico, 1831	Transistor, 1947
Primer telégrafo de trenes, 1837	Fotocopiadora, 1948
Dínamo, 1855	Célula o pila solar, 1954
Altavoz y micrófono, 1875	Mando a distancia, 1956
Teléfono, 1876	"Mouse" para computadora, 1968 (Se comercializó en 1983)
Lámpara incandescente efectiva, 1879 (40 h de duración)	Primera transmisión televisiva vía satélite, 1968
Primeras centrales eléctricas, década de 1880 (12 W)	Microprocesador, 1971
Generador eléctrico eólico, 1891	Pantallas de cristal líquido, década de 1970
Telegrafía inalámbrica, 1895	Videos domésticos, década de 1970
Acondicionador de aire, 1902	Computadora personal, 1975
Secador de pelo eléctrico, 1905	Impresora láser, 1977
Comunicación de la voz humana a través de la radio, 1906	Amplio uso del Fax, 1980 (su uso se inició en 1956)
Primera transmisión regular de radio, 1920	Teléfono móvil, 1983
Guitarra eléctrica, 1932	Redes locales de computadoras en universidades y corporaciones, década de 1980
Lámpara fluorescente, 1933	Interconexión de redes locales de computadoras entre sí (Internet), finales de 1980
Radar, 1935	Correo electrónico, hacia 1990

1.2.2. Noción de circuito eléctrico

Todas las instalaciones eléctricas, desde una tan simple como la mostrada en la figura 1.3, hasta otras más complejas, como las requeridas para poner a funcionar los desarrollos tecnológicos relacionados en la tabla 1.1, o cualquier otro equipo eléctrico utilizado en la vida cotidiana, están formadas por **sistemas de dispositivos conectados entre sí**. Tales sistemas se denominan **circuitos eléctricos**.



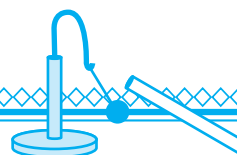
En el circuito eléctrico de la figura 1.3, identifica los cuatro elementos básicos de los circuitos.

Fig. 1.3. Circuito eléctrico formado por una pila, un bombillito y un interruptor, conectados mediante cables.

Un **circuito eléctrico** es un conjunto de componentes eléctricos conectados entre sí formando una trayectoria cerrada. En su funcionamiento intervienen cuatro elementos básicos: 1) generador o fuente de electricidad (“entrada”), 2) conductores y otros dispositivos para la transmisión de la energía eléctrica, 3) dispositivos de control y 4) receptores o consumidores (“salida”).

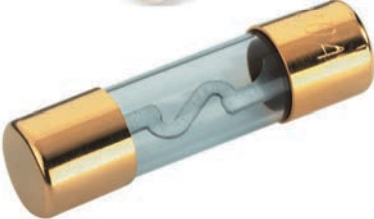
Argumenta por qué los circuitos eléctricos pueden considerarse sistemas.

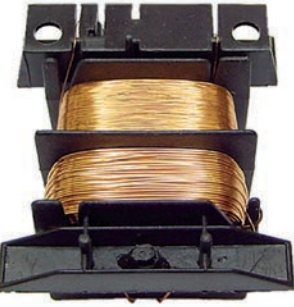
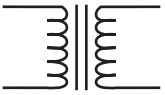




En la tabla 1.2 se muestran los símbolos con que habitualmente se representan algunos dispositivos utilizados en los circuitos eléctricos.

Tabla 1.2. Símbolos de algunos dispositivos eléctricos.

Dispositivo	Ejemplo	Símbolo
Fuente de electricidad		
Interruptor		
Fusible		
Bombillo		
Timbre eléctrico		

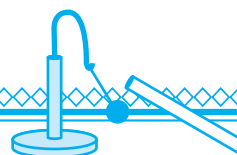
Resistor		
Motor		
Transformador		
Condensador o Capacitor		



Utilizando los símbolos de la tabla 1.2, dibuja un esquema del circuito eléctrico de la figura 1.3.

Explica desde el punto de vista de la energía cuál es la función que realizan las fuentes y los receptores en un circuito eléctrico.

En el funcionamiento del circuito de la figura 1.3 ¿cuáles pudieran considerarse la "entrada", y la "salida" del sistema?



Hemos subrayado la importancia que ha tenido la electricidad para los seres humanos y el hecho de que para su utilización se requiere de **circuitos eléctricos**. En los primeros dos capítulos del libro profundizaremos en cuestiones que nos permitirán comprender qué es la electricidad y cómo funcionan los circuitos eléctricos, en particular, intentaremos responder preguntas como las siguientes:

¿En qué consiste la electricidad? ¿Cómo se genera? ¿Cómo funcionan los circuitos eléctricos y algunos de los dispositivos que en ellos se utilizan? ¿Será posible emplear algunos pocos conceptos para describir el funcionamiento de los circuitos, pese a la inmensa variedad de ellos?

1.2 Electrostática

Comenzaremos por responder la primera pregunta formulada, *¿qué es la electricidad?* Ello te relacionará con interesantes fenómenos y aplicaciones de la electricidad.

1.2.1 Electrización de los cuerpos

Ya los antiguos griegos advirtieron –600 años antes de nuestra era– que al frotar con piel un trozo de cierta resina fósil que llamaban **elektrón** (actualmente denominada **ámbar**), adquiría la **propiedad de atraer pedazos ligeros de otros materiales**, como por ejemplo, pequeñas pajas, o plumas de aves. Más de 2 000 años después, en el siglo XVI, el físico y médico inglés William Gilbert (1544-1603) encontró que otros muchos materiales también tienen esa propiedad, por lo que los denominó **eléctricos**, es decir, semejantes al **elektrón** (al ámbar). Fue de ese modo que la palabra **electricidad** se introdujo en el lenguaje de la ciencia.

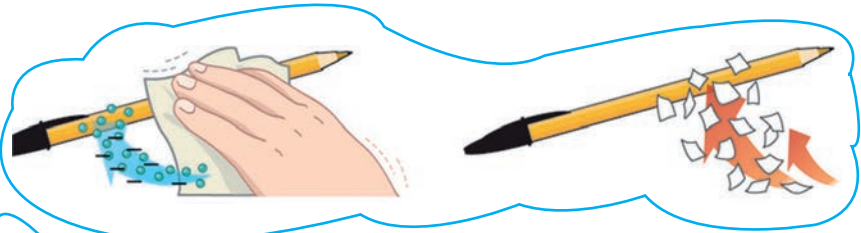
De los cuerpos que al ser frotados adquieren la propiedad de atraer a otros, comúnmente se dice que están **electrizados**, o que se han **cargado eléctricamente**.



William Gilbert (1544-1603), físico y médico inglés conocido sobre todo por sus experimentos originales sobre la naturaleza de la electricidad y el magnetismo.



Frota con papel una regla plástica (o un bolígrafo) y acércalo a pequeños pedacitos de papel. Describe lo observado.

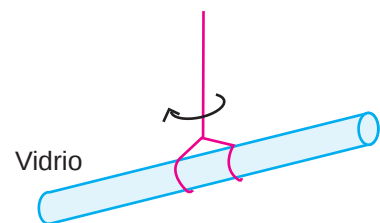
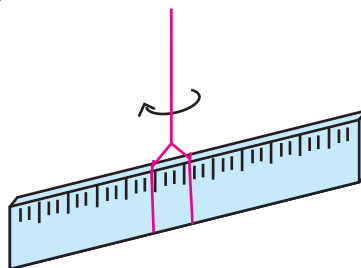


¿Será unilateral la acción de un cuerpo electrizado sobre otro, o consistirá en una acción mutua? Argumenta tu respuesta. Intenta comprobarla.

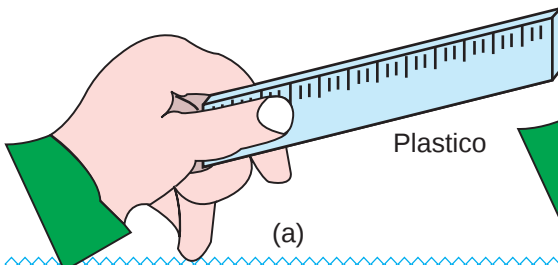
En el siglo XVIII los experimentadores descubrieron que existen **dos tipos de electricidad**. Así, dos reglas plásticas frotadas con papel se **repelen** entre sí (Fig. 1.4a), y lo mismo ocurre con dos varillas de vidrio frotadas con seda (Fig. 1.4b), sin embargo, al aproximar entre ellas una regla plástica y una varilla de vidrio previamente frotadas (Fig. 1.4c), no se repelen sino que se **atraen**. Esto pone de manifiesto que el plástico y el vidrio adquieren diferentes tipos de electricidad.



Piel

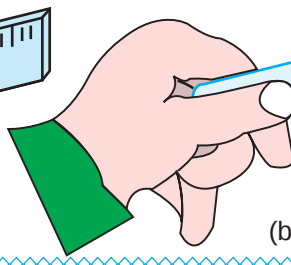


Vidrio



(a)

Plástico



(b)



Seda

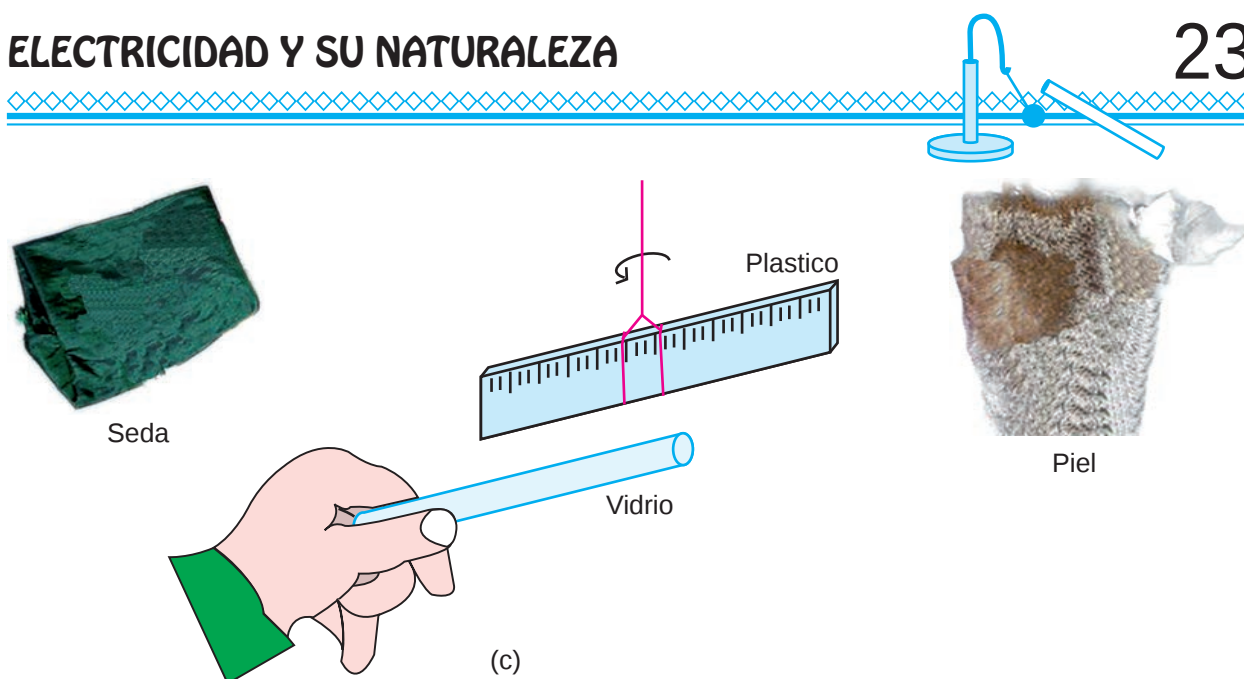


Fig. 1.4. (a) Dos reglas plásticas frotadas con papel se repelen entre sí, (b) dos varillas de vidrio frotadas con seda también se repelen entre ellas, (c) pero la regla plástica y la varilla de vidrio previamente frotadas, se atraen, lo cual muestra que adquieren distinto tipo de electricidad.

Convencionalmente, la electricidad que es como la adquirida por el vidrio al ser frotado se llama **positiva (+)** y la que es como la de las resinas o plásticos, **negativa (-)**.

¿Y no pudiera haberse llamado positiva a la electricidad adquirida por el plástico y negativa a la adquirida por el vidrio?

Por supuesto que sí, denominar una positiva y otra negativa es convencional, de modo similar que elegir un sentido de movimiento positivo y el contrario negativo.

Los cuerpos electrizados con el mismo tipo de electricidad (de igual signo) se **repelen** y los electrizados con diferente tipo (diferentes signos), se **atraen**.

Las experiencias anteriores evidencian que **la fuerza de interacción entre dos cuerpos electrizados, depende de la distancia entre ellos**. Mientras mayor sea dicha distancia, menor será dicha fuerza.





Señala las similitudes y diferencias que encuentres entre la fuerza gravitatoria y la fuerza eléctrica.



Intenta electrizar, frotándolos con papel u otros materiales, un lápiz o un pedazo de metal. ¿Es posible?

Probablemente te preguntarás por qué unos cuerpos se electrizan al ser frotados y otros no, en particular, ¿por qué es tan fácil electrizar una regla plástica y, sin embargo, parece imposible electrizar una varilla metálica?

En realidad cualquier cuerpo puede, en principio, ser electrizado mediante frotamiento, lo que sucede es que unos materiales **conducen la electricidad** mejor que otros. Así, los plásticos habituales la conducen muy mal, el cuerpo humano bastante bien y los metales muy bien. Por eso es que podemos electrizar un cuerpo plástico que sostenemos con la mano, mientras que uno metálico no. La electricidad producida al frotar la varilla metálica escapa inmediatamente de ella a través de nuestra mano.

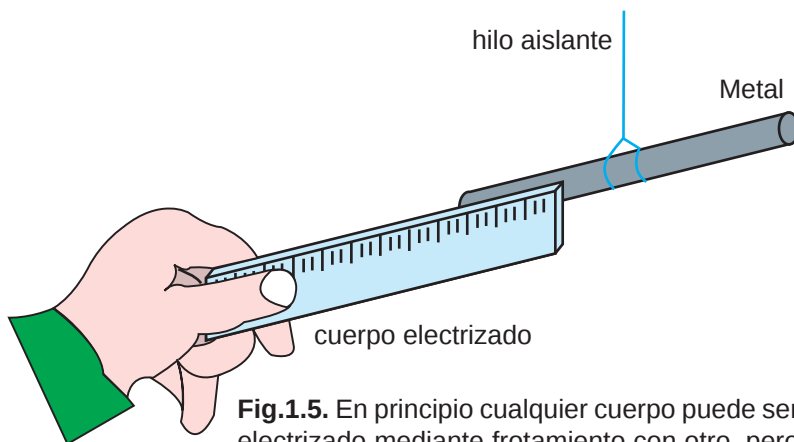
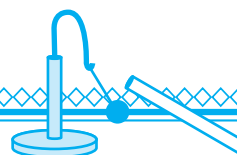


Fig.1.5. En principio cualquier cuerpo puede ser electrizado mediante frotamiento con otro, pero para ello, los que conducen bien la electricidad deben ser aislados.

Sin embargo, es posible electrizar una varilla metálica utilizando un mango aislador para sostenerla mientras se frota, o suspendiéndola de un hilo aislante y después rozándola con un cuerpo previamente electrizado (Fig. 1.5).



Cuando un cuerpo electrizado se aproxima a otro, a veces se producen chispas antes de tocarlo. El propio Newton, luego de observar tales chispas escribió: “La chispa me recordó un relámpago en pequeñas, muy pequeñas dimensiones”. En 1752, Benjamin Franklin, mediante un experimento sumamente peligroso, comprobó que, en efecto, el rayo tiene una naturaleza eléctrica. Elevó un papalote en un día de tormenta y logró transmitir a través de él electricidad de las nubes, provocando chispas y electrizando un cuerpo.



Indaga sobre los experimentos realizados por Benjamin Franklin con el propósito de confirmar la naturaleza eléctrica del rayo.

La electrización de los cuerpos es tomada en cuenta unas veces para defendernos de ella y otras para aprovecharla en el diseño de ciertos desarrollos tecnológicos. El pararrayos, por ejemplo, nos protege de las descargas eléctricas atmosféricas originadas por la electrización de las nubes. En las fábricas textiles se hace necesario tomar medidas contra la electrización de los hilos, que con el roce se electrizan enredándose y acumulando polvo.

Por su parte, cierta tecnología de recolección de hollín en las chimeneas, la dirección del movimiento de las pequeñísimas gotitas de tinta en una impresora de chorro y el fotocopiado, son ejemplos en que el fenómeno de la electrización ha sido aprovechado por el hombre. Durante el fotocopiado, en la superficie de un rodillo, mientras gira, se va creando una “imagen”, formada por electricidad positiva, de las letras y figuras que se copiarán. Esta “imagen” atrae finas partículas de “toner” cargadas negativamente. A





Indaga en alguna enciclopedia sobre las aplicaciones de la electrización de los cuerpos.



continuación, la hoja de papel, también electrizada, atrae hacia sí a las partículas que han formado letras y figuras en el rodillo. Finalmente, las partículas de polvo, ya en el papel, se funden mediante elevación de la temperatura, con lo cual resulta la impresión.

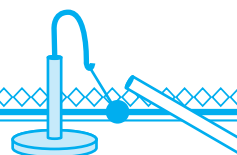
En algunos recipientes de comida preparada se usa una fina cubierta de plástico que se adhiere al recipiente sin pegamento alguno. ¿Cómo se explica esto?



Los experimentos y hechos analizados anteriormente ponen de manifiesto que **la electricidad se transmite** de unos cuerpos a otros, o a través de ellos, pese a que no ocurre cambio visible alguno, *¿qué es entonces lo que se transmite de un cuerpo a otro? ¿cuál es la naturaleza de la electricidad?*

1.2.2 Naturaleza de la electricidad

En el siglo XVIII se plantearon dos hipótesis básicas para explicar la electrización de los cuerpos. Una consideraba que a cada uno de los dos tipos de electricidad que hemos mencionado, positiva y negativa, correspondía **un fluido**. La otra afirmaba que el fluido es uno solo, de electricidad positiva, y que los materiales en sí mismos tienen electricidad negativa. De acuerdo con la primera hipótesis, la electrización de los cuerpos se explicaba por el exceso en ellos de alguno de los dos fluidos y, de acuerdo con la segunda, por el exceso o defecto del fluido positivo. En



ambos casos se consideraba que los fluidos eran continuos, en aquella época se desconocía que los cuerpos están formados por electrones, protones y neutrones.

En realidad, **los responsables de que hayan dos tipos de electrización de los cuerpos son los electrones y protones que constituyen los átomos.**

Los electrones poseen el tipo de electricidad que se denomina negativa (-) y los protones, el que se llama positiva (+). Durante la electrización, cierta cantidad de electrones se desplaza de un cuerpo a otro, o de una parte a otra del propio cuerpo, dando lugar a un exceso o defecto de un tipo u otro de electricidad. La parte con exceso de electrones quedará electrizada negativamente y la parte con defecto de ellos, positivamente.

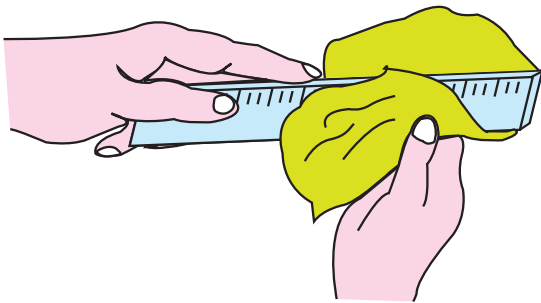


Joseph John Thomson (1856-1940). Se considera el descubridor del electrón (1897), primer constituyente del átomo que se descubrió. Este hallazgo revolucionó la idea que se tenía de que los átomos son indivisibles.

Al frotar una regla plástica con papel, ¿dónde queda exceso de electrones y dónde defecto de ellos? ¿Y al frotar una varilla de vidrio con un paño de seda?

El número de electrones que pasa de un cuerpo a otro durante una experiencia común de electrización por frotamiento es enorme (Fig.1.7a). Es difícil determinar la cantidad que se transfiere a una regla plástica al frotarla con papel, sobre todo porque depende de las condiciones en que se realiza la experiencia, pero la cifra pudiera ser de miles de millones de electrones (del orden de 10^9). Esta fabulosa cifra es, sin embargo, insignificante comparada con la cantidad total de electrones que hay en toda la regla. En una descarga eléctrica atmosférica (Fig.1.7b) pueden transferirse alrededor de 10^{20} electrones, no obstante, el número total de los que hay en la regla es todavía mayor.





(a)



(b)

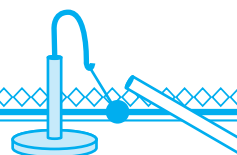
Fig. 1.7. (a) La cantidad de electrones que se transfiere a una regla plástica al frotarla con papel es enorme, pudiera ser de miles de millones. (b) La cantidad de electrones que se transfiere en una descarga eléctrica es muchísimo mayor, alrededor de 10^{20} electrones, pero el número total de los que hay en la regla es todavía mayor.

Cabe subrayar que no es indispensable frotar dos cuerpos entre sí para que se transfieran electrones de uno a otro, basta con que hagan **buen contacto** y sean de **distintos materiales**. Hacia dónde pasan los electrones y en qué cantidad, depende -dicho muy simplifícadamente- de las características de los materiales, en particular de la concentración de electrones en ellos y de la capacidad de sus átomos o moléculas para atraer a los electrones hacia sí. Mientras mayor sea la diferencia entre dos materiales en lo que respecta a estas características, más fácilmente se electrizarán al ponerlos en contacto. Por supuesto, la cantidad de electrones que se transfiere también depende del número de puntos de las superficies de los cuerpos que entran en contacto, y dicho número aumenta con el frotamiento.

Al poner en contacto estrecho dos cuerpos de materiales diferentes, pueden pasar electrones de uno a otro, quedando ambos electrizados.



Si para electrizar un cuerpo basta con que haga buen contacto con otro de material diferente, entonces ¿qué papel desempeña el frotamiento en las experiencias de electrización?



Hemos visto que dos cuerpos con electricidad de signos opuestos se atraen al aproximarlos, pero sabemos que un cuerpo electrizado también es capaz de atraer a otros neutros (Fig. 1.8). ¿Cómo se explica esto?

Consideremos primeramente el caso en que el cuerpo electrizado se aproxima a un buen conductor, por ejemplo, una regla plástica electrizada negativamente que se acerca a una varilla metálica neutra (Fig. 1.9). En los metales, los electrones más externos de los átomos, a causa de la interacción entre éstos, han perdido los enlaces con un átomo dado y se mueven libremente entre ellos (gracias a esto es que son buenos conductores de la electricidad). Por eso, al acercar la regla plástica electrizada negativamente a la varilla metálica los electrones de ésta, al ser repelidos por la regla, se alejan de ella. La concentración de ellos en la parte de la varilla cercana a la regla se hace menor y en la parte más alejada mayor. La parte próxima a la varilla metálica queda así electrizada positivamente y la alejada, negativamente. Puesto que la fuerza eléctrica disminuye con la distancia y la regla electrizada negativamente está más cerca de la parte positiva de la varilla que de la negativa, predomina la atracción sobre la repulsión, dando por resultado una fuerza neta atractiva entre la regla y la varilla.



Fig.1.8. Un cuerpo electrizado es capaz de atraer no solo a otros electrizados, sino también neutros.

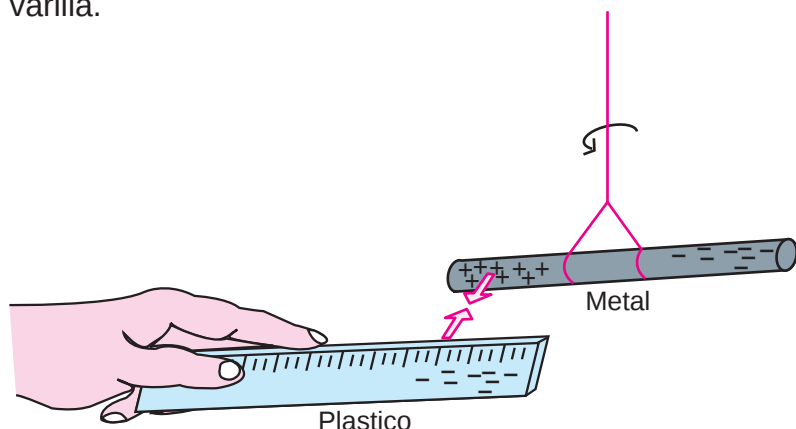


Fig. 1.9. Debido a las fuerzas de repulsión entre los electrones de la regla plástica y de la varilla metálica, la concentración de ellos disminuye en la parte de la varilla próxima a la regla y aumenta en alejada de ella. El resultado es una fuerza neta de atracción entre la regla y la varilla.

Examinemos ahora la situación en que la regla plástica electrizada se aproxima a cuerpos neutros malos conductores de la electricidad. En este caso los electrones no pueden moverse libremente a través del cuerpo, pero se desplazan ligeramente en el interior de las moléculas o átomos (Fig. 1.10), lo que ocasiona que, en promedio, queden más alejados de la regla que los núcleos atómicos, en los que se encuentran los protones. El resultado es una fuerza neta de atracción. Sobre esta cuestión profundizaremos en el apartado 1.2.7.

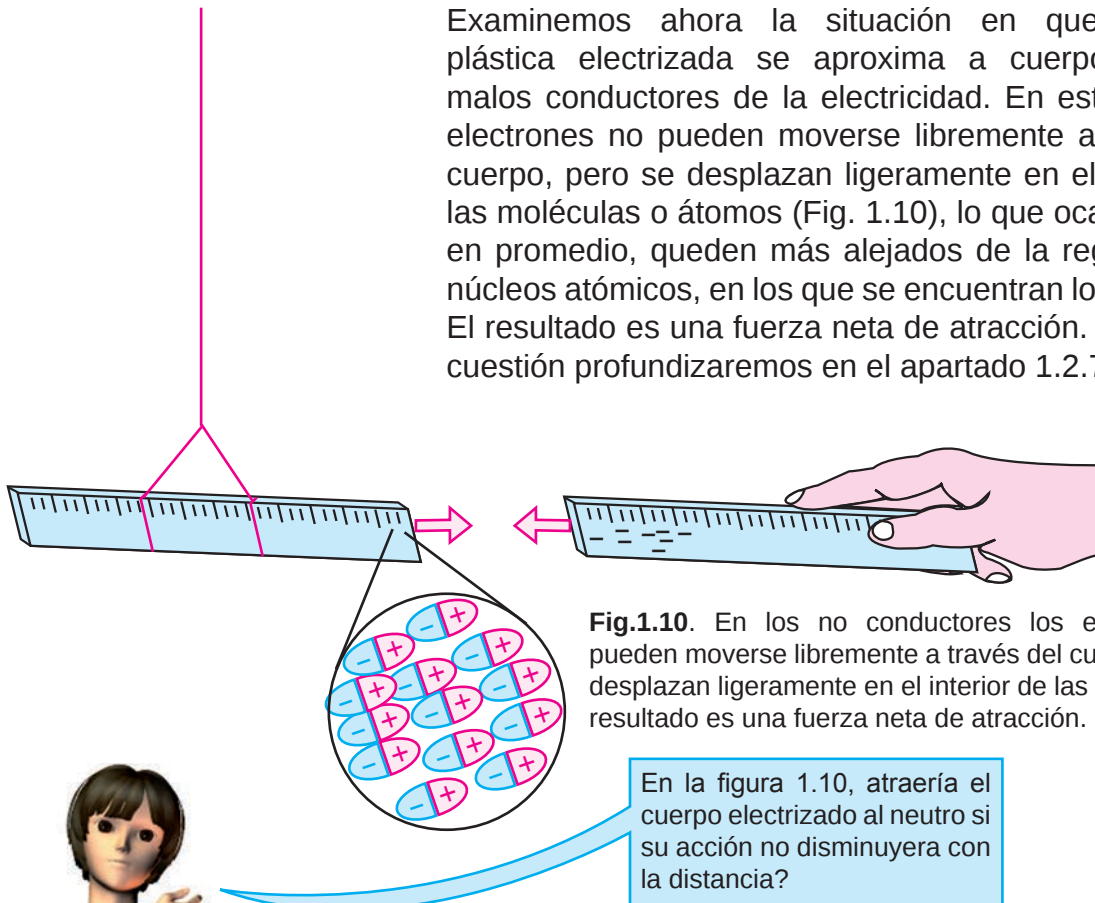


Fig.1.10. En los no conductores los electrones no pueden moverse libremente a través del cuerpo, pero se desplazan ligeramente en el interior de las moléculas. El resultado es una fuerza neta de atracción.

En la figura 1.10, atraería el cuerpo electrizado al neutro si su acción no disminuyera con la distancia?



Hemos visto que los cuerpos pueden ser electrizados, 1) poniéndolos en contacto estrecho con otro cuerpo de un material diferente, contacto que mejora al frotarlos entre sí y 2) transfiriéndoles directamente parte de la electricidad de otro cuerpo (Fig. 1.5). La explicación que acabamos de dar sobre lo que ocurre al acercar un cuerpo electrizado a otro metálico neutro (Fig.1.9) sugiere un tercer procedimiento de electrización. En efecto, si en la experiencia de la figura 1.9 conectásemos la varilla metálica con la tierra, mediante un conductor, o simplemente tocando la varilla con un dedo, entonces los electrones que antes se acumulaban en exceso en el extremo de la varilla, ahora se desplazarán fuera de ella. Si a continuación desconectamos la varilla metálica de la tierra, ella quedará electrizada positivamente, aún después de retirar la regla plástica. Observa que mientras en los dos primeros procedimientos mencionados la electrización se realiza por contacto entre los cuerpos, en este caso se lleva a cabo de un modo indirecto. Por eso algunos denominan este tercer procedimiento, **electrización por inducción**.

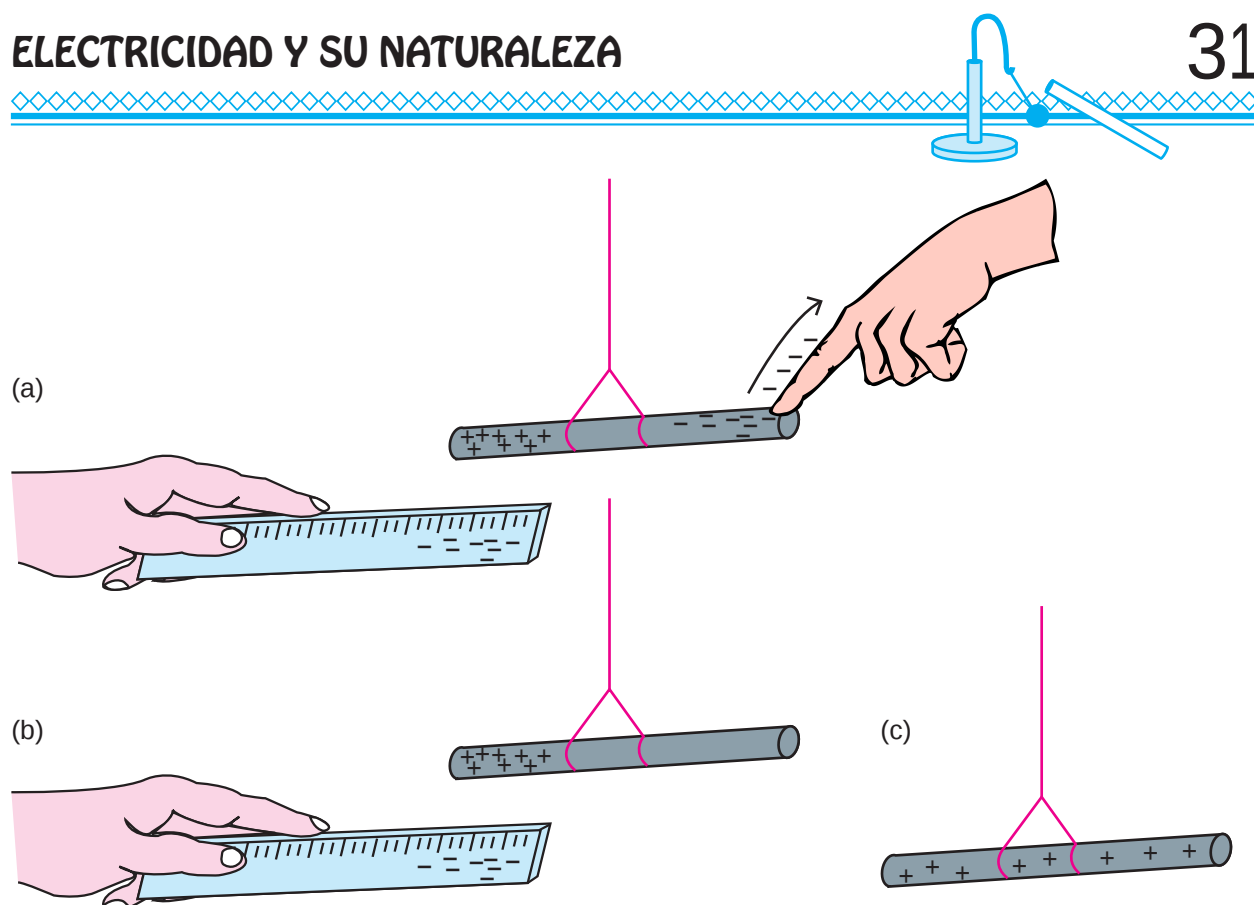


Fig. 1.11. Proceso de electrización de una varilla metálica: (a) la varilla metálica se conecta a tierra a través de la persona y los electrones que antes se acumulaban en su extremo, se desplazan fuera de ella, (b) se retira el dedo y (c) se retira la regla.

¿Pudiera emplearse el procedimiento de electrización descrito en la figura 1.11 para electrizar un cuerpo plástico en lugar de uno metálico? Argumenta.

Observa que en el procedimiento descrito en el pie de la figura 1.11 se dice que se retira el dedo y luego la regla plástica. ¿No podría ser a la inversa? Argumenta.

¿Cómo quedaría cargada la varilla metálica de la figura 1.11, si en vez de la regla plástica se le aproximara una varilla de vidrio cargada positivamente? Argumenta.





1.2.3. Carga eléctrica.

Ya conoces que un cuerpo puede estar electrizado en mayor o menor grado. Se denomina **carga eléctrica**, o simplemente **carga**, a la magnitud física que caracteriza el grado de electrización de los cuerpos.

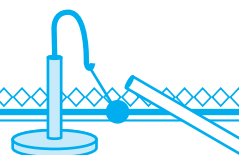
Si la cantidad de electrones que hay en un cuerpo es igual a la de protones, no está electrizado y se dice que su carga eléctrica es cero. Mientras mayor sea el exceso o defecto de electrones que tenga, mayor será su carga. Al hablar de la carga eléctrica de un cuerpo, en realidad se está haciendo referencia al exceso o defecto de ellos.

Además de los electrones y protones, hay otras **partículas elementales** con carga eléctrica de la misma magnitud que el electrón y el protón. Pero de ellas, solo los electrones y protones pueden existir en estado libre por tiempo ilimitado, las demás tienen tiempos de vida inferiores a la millonésima de segundo.

La carga eléctrica de electrones, protones y otras partículas elementales es una propiedad inseparable de esas partículas, no puede eliminarse de ellas, del mismo modo que tampoco es posible eliminar la masa de un cuerpo. Es verdad que los protones y neutrones están formados por otras partículas denominadas **quarks**, con cargas $1/3$ y $2/3$ de la que poseen el electrón y el protón, pero hasta ahora no se han podido detectar quarks individuales y hay razones para suponer que ello no es posible.

Por consiguiente, hasta ahora la carga eléctrica del electrón (o del protón) representa una **cantidad mínima de carga**, imposible de dividir. Ella se denomina **carga eléctrica elemental**.

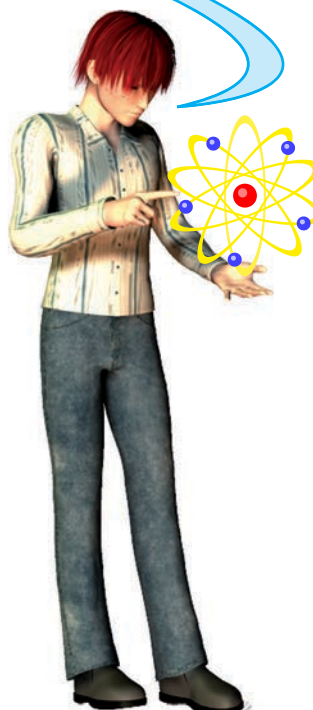
Puesto que los procesos de electrización se realizan mediante transferencia de electrones, la carga transferida es un múltiplo entero de la carga del electrón. Por eso, la carga eléctrica de los cuerpos habituales, así como la de las moléculas, átomos y partículas elementales, siempre es un múltiplo entero de la carga elemental, lo



que suele expresarse diciendo que la carga eléctrica está **cuantizada**.

Ya sabes que durante la electrización de un cuerpo por contacto con otro, uno de ellos se electriza positivamente y el otro negativamente. Es posible comprobar experimentalmente que las cargas eléctricas que adquieren son de igual magnitud. Para ello puede utilizarse, por ejemplo, un instrumento denominado **electroscopio**, o más exactamente, una variante suya más perfeccionada, llamada **electrómetro**. Como su nombre indica, éste es un medidor de electricidad. En la figura 1.12 se muestra una de las variantes de electrómetro más simples y en la figura 1.13 uno moderno, electrónico.

Explica con tus propias palabras qué significa que la carga eléctrica está cuantizada.



Indaga en alguna enciclopedia acerca del electroscopio y su funcionamiento e intenta construir uno. Consulta también la sección del libro Actividades para el aula y la casa.

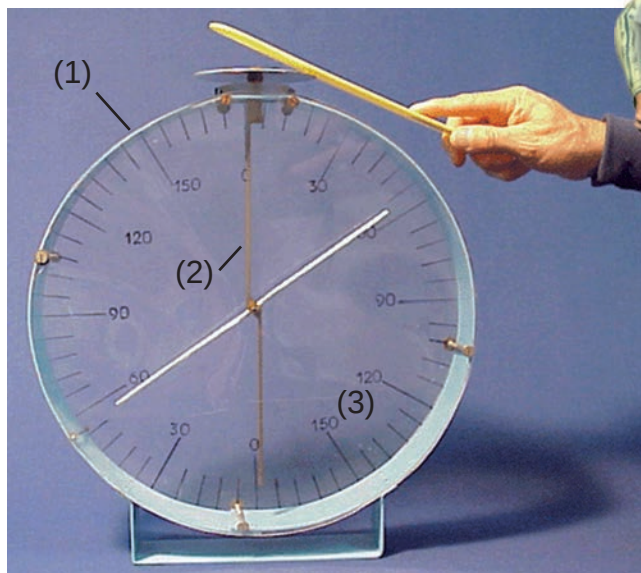


Fig. 1.12. Electrómetro simple constituido por: (1) cuerpo metálico que produce aislamiento eléctrico del exterior, (2) pieza metálica a la cual se acopla una pequeña varilla de aluminio que actúa como indicador, (3) escala.



Fig. 1.13. Un electrómetro electrónico digital, es similar a un voltímetro, pero posee una elevadísima resistencia de entrada, del orden de 10^{12} ohm, característica que lo encarece.

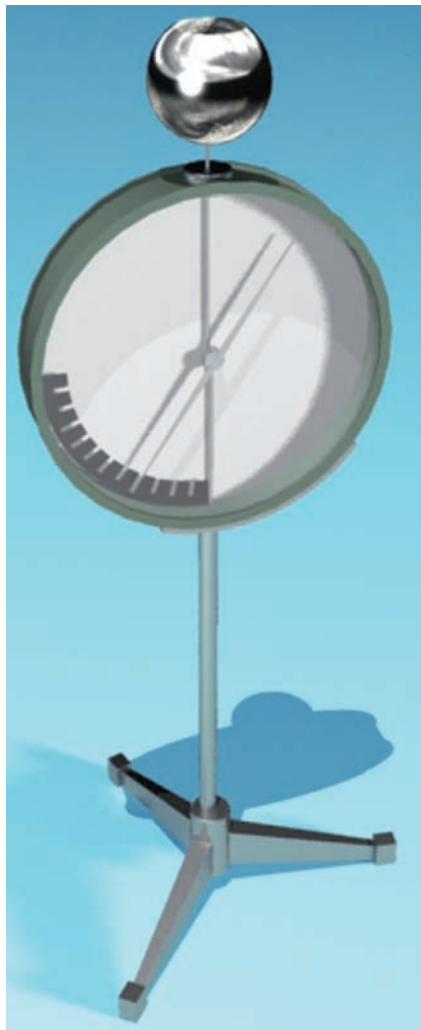


Fig. 1.14. Electrómetro con esfera metálica hueca acoplada a la varilla conductora.

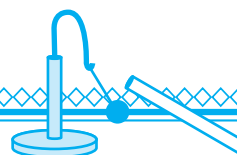
El modelo de la figura 1.12 consta de un cuerpo cilíndrico metálico, cuya función es, aparte de servir de sostén a la pieza fundamental situada en su interior, producir un aislamiento eléctrico del exterior. La parte fundamental está formada por una pieza metálica, fija al cuerpo del instrumento pero aislada eléctricamente de él, a la cual se acopla una pequeña varilla de aluminio que puede girar a modo de indicador. El extremo superior de la pieza metálica sale al exterior y en él se fija un disco, o una esfera. Si éstos se tocan con un cuerpo cargado, parte de la carga se transfiere a la pieza metálica y al indicador, provocando la desviación éste.

Para comprobar que al frotar entre sí dos cuerpos las cargas que adquieren son de igual magnitud, se fija a la varilla que sale del electrómetro una esfera metálica con una abertura (Fig. 1.14). Como cuerpos que se frotan pueden utilizarse, por ejemplo, una pequeña lámina de ebonita y otra de plexiglás, sujetadas por medio de mangos aislantes. Luego de frotarlas, se introduce una de ellas en el interior de la esfera, pero sin tocar ésta, y se observa la indicación del electrómetro. Al extraer esa lámina e introducir la otra, se aprecia que la indicación del electrómetro es la misma, lo cual significa que las cargas eléctricas de las láminas son de igual magnitud. Si ahora se introducen ambas láminas a la vez dentro de la esfera, el indicador del electrómetro no se mueve, lo que confirma que las cargas de las láminas, además de tener igual magnitud, son de signos contrarios.

Explica desde el punto de vista microscópico por qué el indicador del electrómetro se desvía al introducir un cuerpo cargado dentro de la esfera (Fig. 1.14)



¿Por qué en la experiencia de la figura 1.14 para demostrar que las cargas que adquieren las láminas son de signos opuestos, no basta con introducir dentro de la esfera primero una de las láminas y luego la otra, y se requiere introducir las dos al mismo tiempo?



Los resultados anteriores pueden ser descritos del siguiente modo. Inicialmente las láminas de ebonita y plexiglás no están cargadas, por lo que la carga total del sistema formado por las dos es cero. Debido a la interacción que tiene lugar entre ellas durante el frotamiento, la carga de cada lámina deja de ser cero. Sin embargo, la carga total del sistema formado por las dos, continúa siendo cero, lo que significa que el frotamiento no crea carga, sino que solo contribuye a que se transfiera de un cuerpo a otro, la carga total **se conserva**. Probablemente esta descripción se te asemeje en algo a las realizadas al estudiar las leyes de conservación de la energía y la cantidad de movimiento. Y en efecto, se trata de otra ley de conservación, la **ley de conservación de la carga eléctrica**:

La carga eléctrica total de un sistema se conserva, si el sistema está aislado.

Lo mismo que las leyes de conservación de la energía y de la cantidad de movimiento, la de conservación de la carga es universal. En las desintegraciones radiactivas y en las reacciones nucleares de síntesis, en que desaparecen unos elementos y aparecen otros, e incluso en las interacciones en que se aniquilan o crean partículas elementales, como la de aniquilación o surgimiento del par electrón-positrón, la carga total del sistema siempre permanece constante.

Las interacciones fuerte y débil se manifiestan, como ya hemos dicho, solo a distancias menores de 10^{-15} m. Las Interacciones gravitatoria y electromagnética tienen muchísimo mayor alcance, pero la intensidad de la electromagnética supera en un número inmenso de veces a la intensidad de la gravitatoria. Así, por ejemplo, en el átomo de hidrógeno la fuerza eléctrica entre el protón que constituye su núcleo y el electrón es 10^{39} veces mayor que la fuerza de atracción gravitatoria entre ellos. La interacción entre partículas elementales con carga eléctrica, entre ellas el electrón y el protón es, pues, esencialmente electromagnética. Y lo mismo puede decirse de los cuerpos macroscópicos cargados eléctricamente. Al aproximar entre sí dos cuerpos habituales, como por ejemplo una regla plástica y un pedacito de papel, no es posible percibir

¿Por qué si constatamos que entre dos cuerpos habituales se ejerce una fuerza significativa, podemos estar seguros que ella tiene un origen electromagnético?





Resume con tus palabras las propiedades fundamentales de la carga eléctrica.



la fuerza gravitatoria entre ellos, pero basta que la regla esté ligeramente electrizada para que podamos apreciar la fuerza debida a la interacción electromagnética.

Hemos visto varias propiedades fundamentales de la carga eléctrica: que hay un valor mínimo de ella, denominado **carga eléctrica elemental**, el cual coincide con la carga del electrón y del protón; que está **cuantizada**, pues se debe al exceso o defecto de electrones en los cuerpos y, por último, que puede transferirse de unos cuerpos a otros, pero que en total, si el sistema de partículas o cuerpos está aislado, **se conserva**. También habrás advertido que la magnitud de la fuerza ejercida entre dos cuerpos electrizados depende, además de la distancia entre ellos, de la magnitud de las cargas que poseen. En el próximo apartado profundizaremos en esta última cuestión.

1.2.4. Ley de Coulomb.

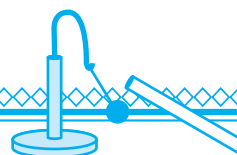
El caso más simple de interacción electromagnética entre cuerpos o partículas con carga eléctrica es aquel en que están en reposo. La parte del electromagnetismo que estudia la interacción electromagnética entre cuerpos o partículas cargados sin considerar el movimiento de éstos se denomina **Electrostática**.

La **ley fundamental de la Electrostática** es la ley de la fuerza que actúa entre dos partículas cargadas en reposo:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

donde q_1 y q_2 son las magnitudes de las cargas que tienen las partículas, r la distancia entre ellas, k un coeficiente de proporcionalidad y F la magnitud de la fuerza.

Dicha ley fue conocida a partir de los experimentos realizados por el físico francés Charles A. Coulomb en 1785, por lo que se denominó **ley de Coulomb**. La constante k a veces se denomina **constante de Coulomb**. Casi cien años después se supo que en realidad el científico inglés Henry Cavendish, célebre por la determinación de la constante de



gravitación universal, había llegado a la ley antes que Coulomb.

Asombrosamente, la expresión matemática de la ley de Coulomb es similar a la de la ley de Gravitación Universal. Como sabes, en ésta, en lugar de las cargas intervienen las masas y el papel de k lo desempeña la constante de gravitación universal:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Las leyes difieren en que mientras la fuerza de gravitación es siempre de atracción, la fuerza de Coulomb puede ser tanto de atracción como de repulsión, en dependencia de los signos de las cargas.



Fig. 1.15. Charles A. Coulomb (1736-1806), científico francés, que destacó por sus trabajos sobre electricidad y magnetismo y por sus investigación de la fuerza de rozamiento.

Puesto que la fuerza entre dos partículas con carga es o de atracción o de repulsión, dicha fuerza está siempre en la línea que las une.

De este modo, la ley puede formularse en palabras del siguiente modo:

La fuerza de interacción entre dos partículas cargadas en reposo es directamente proporcional al producto de los módulos de las cargas, inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellas y está en la línea que las une.

Nota que lo mismo que la ley de Gravitación, la de Coulomb es válida para **partículas, cuerpos que pueden considerarse como puntos**, en cuyo caso la distancia r entre ellos está bien definida. Para calcular la fuerza entre dos cuerpos cargados habituales, en principio sería necesario considerarlos como compuestos por infinidad de pequeñas porciones cargadas y hallar la suma de las fuerzas ejercidas entre todas ellas.



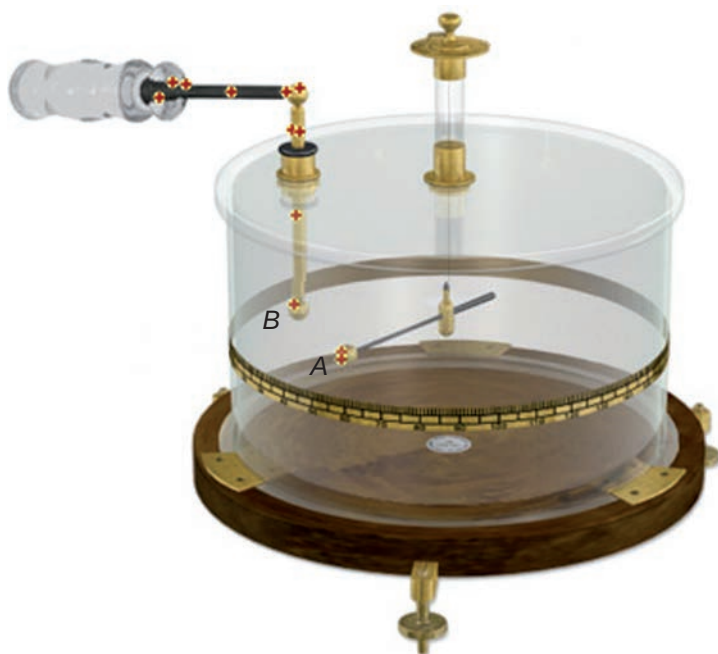
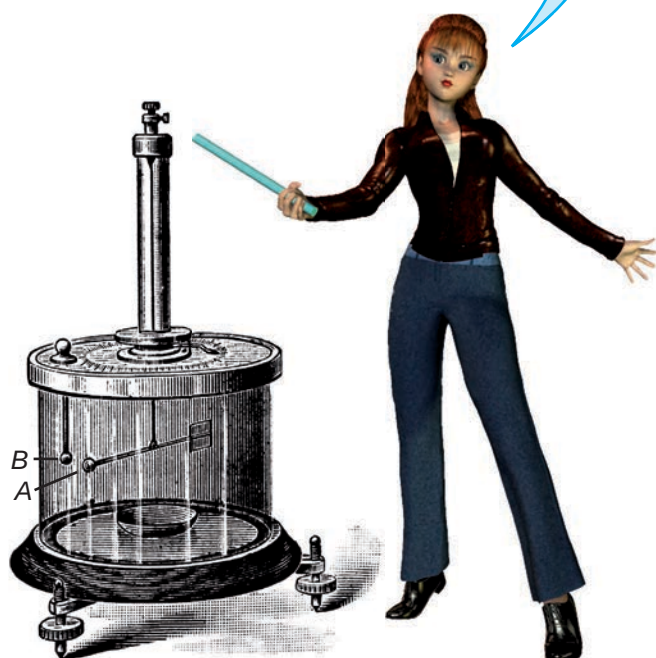


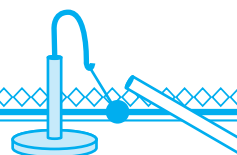
Fig. 1.16. Esquema del dispositivo utilizado por Coulomb para establecer la ley de la fuerza de interacción entre dos partículas cargadas.

¿Por qué la distribución de las cargas en las esferas A y B del experimento de Coulomb no es estrictamente uniforme?



En la figura 1.16 se muestra un esquema del dispositivo utilizado por Coulomb. Básicamente consiste en una **balanza de torsión**, la cual está formada por una fibra de torsión a cuyo extremo inferior se fija una barrita aislante con dos esferas en sus extremos. Otra esfera está suspendida de la tapa del dispositivo mediante una varilla. Al comunicarle cargas del mismo signo a las esferas A y B, la balanza rota y a partir del ángulo girado puede determinarse la fuerza entre las esferas. Para mantener la misma distancia entre las esferas al variar la carga, Coulomb giraba la pieza de la cual está suspendida la fibra y a partir del ángulo girado determinaba la fuerza. En el experimento, las esferas A y B no podían considerarse puntos, pues la distancia entre ellas no era grande, Coulomb medía la distancia r entre sus centros. Si la distribución de carga en las esferas tiene simetría esférica, entonces, en efecto, de modo parecido que en el caso de la gravitación, es posible considerar que toda la carga está concentrada en sus centros. En el experimento, Coulomb no tuvo en cuenta que la distribución de cargas en las esferas no era estrictamente esférica, debido a la presencia de la otra esfera.

La dificultad principal del experimento radicaba en la medición de la carga eléctrica de las esferas. En aquella época ni siquiera se había definido la unidad de carga. Pero Coulomb encontró un modo simple de disminuir la carga inicial de una de las esferas en 2, 4,... veces: la ponía en contacto con otra exactamente



igual pero neutra. Al hacer esto la carga de la esfera se compartía por igual entre las dos. De este modo determinó, que al disminuir la carga de la esfera en 2, 4... veces, la fuerza disminuía en ese mismo número de veces, es decir, que era directamente proporcional a la carga de la esfera.

¿Qué ley fundamental está la base del procedimiento empleado por Coulomb para dividir la carga eléctrica de una de las esferitas de su dispositivo en 2, 4, ?.

En 1798 Cavendish realizó un experimento similar para determinar, a partir de la medición de la fuerza gravitatoria entre dos esferas, la constante de gravitación universal, sólo que la balanza y los cuerpos utilizados en ese caso fueron muchísimo mayores.

En el experimento de Coulomb (Fig. 1.15), ¿será igual la fuerza ejercida por la esfera A sobre la B que la ejercida por la B sobre la A, si las cargas de las esferas no son de igual magnitud? Argumenta



1.2.4.1. Unidad de carga eléctrica.

En principio, la unidad de carga eléctrica puede elegirse a partir de la ley de Coulomb, ya que las unidades fundamentales de las otras magnitudes que intervienen en la ley, distancia y fuerza, han sido definidas. Por ejemplo, podrían situarse dos esferas a un metro una de otra y elegir como unidad de carga aquella que tienen cuando la fuerza entre ellas sea de 1 N. Con tal definición de la unidad de carga, la constante k en la ley de Coulomb tendría el valor 1. En una época se hizo así, sin embargo, en el sistema internacional de unidades (SI), como unidad fundamental para la medición de las magnitudes eléctricas se introdujo el **ampere (A)**, que es la unidad de intensidad de corriente. Por eso, el resto de las unidades de las magnitudes eléctricas, incluida la de carga eléctrica, se definen a partir de esa



unidad. El patrón del ampere se establece basándose en la interacción magnética entre conductores con corriente eléctrica, por lo que profundizaremos en él más adelante. Por ahora diremos que:

La unidad de carga eléctrica, denominada coulomb (C), es la carga que pasa en 1 s por la sección transversal de un conductor cuando la intensidad de corriente es 1 A.

Al definir la unidad de carga de este modo, el coeficiente k en la expresión de la ley de Coulomb debe ser determinado experimentalmente. Su valor es:

$$k = 9.0 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}$$

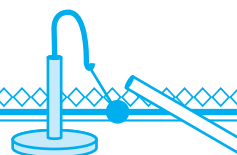
Una carga eléctrica de 1 C es inmensamente grande. Así, la fuerza de interacción entre dos partículas que tuviesen una carga de 1 C cada una, colocadas a 1 m de distancia una de la otra, sería:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} = \left(9.0 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \right) \frac{(1 \text{ C})(1 \text{ C})}{(1 \text{ m})^2} = 9.0 \times 10^9 \text{ N}$$

Esto es solo algo menor que el peso de un cuerpo de mil millones de kilogramos. Se comprenderá que comunicar una carga de 1 C a un cuerpo habitual resulta totalmente imposible. El exceso (o defecto) de electrones en el cuerpo sería tan grande que los electrones (o protones), repeliéndose mutuamente no podrían mantenerse en él. Las cargas que adquieren los cuerpos en las experiencias ordinarias de electrización por frotamiento por lo general son inferiores a $1 \times 10^{-6} \text{ C}$, es decir, $1 \mu\text{C}$.

Expresada en coulomb, la magnitud de la carga de un electrón o un protón, o sea de la **carga eléctrica elemental**, es:

$$e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$$



Ejemplo 1.1. Calcula cuántos electrones hay en una gota de agua de 1.0 milímetro de radio. Considera la densidad del agua 1.0 g/cm^3 y la masa de una molécula $3.0 \times 10^{-23} \text{ g}$.

Cada molécula de agua tiene 10 electrones. Por eso, si hallamos el número de moléculas de agua que hay en la gota, podremos calcular el número total de electrones en ella.

Si llamamos m_g a la masa de la gota y m_m a la masa de una molécula de agua, entonces el número de moléculas en la gota es:

$$N = \frac{m_g}{m_m}$$

La masa de la gota es:

$$m_g = \rho V = \rho \frac{4}{3} \pi r^3 = \left(1.0 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) \frac{4}{3} \pi (1.0 \times 10^{-1} \text{ cm})^3 = 4.19 \times 10^{-3} \text{ g}$$

Por consiguiente el número de moléculas en la gota es:

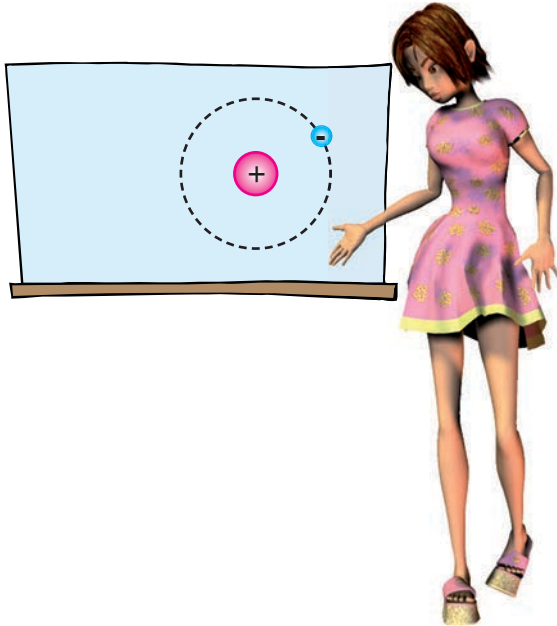
$$N = \frac{m_g}{m_m} = \frac{4.19 \times 10^{-3} \text{ g}}{3.0 \times 10^{-3} \text{ g}} = 1.4 \times 10^{20}$$

Y el número de electrones en ella:

$$10 \times 1.4 \times 10^{20} = 1.4 \times 10^{21} \text{ electrones}$$



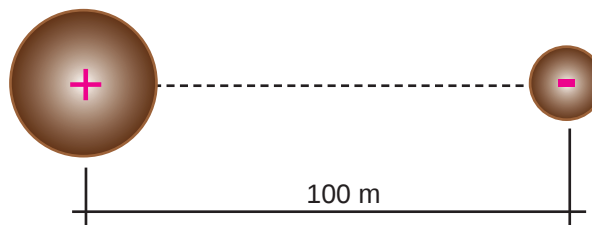
Ejemplo 1.2. Halla la fuerza eléctrica entre el electrón y el núcleo en el átomo de hidrógeno, considerando que el radio de éste es $0.53 \times 10^{-10} \text{ m}$.

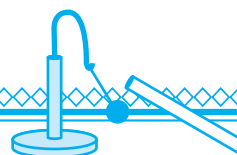


La fuerza entre el electrón y el núcleo está determinada por la ley de Coulomb. La distancia promedio entre ellos es igual al radio del átomo: $r = 0.53 \times 10^{-10} \text{ m}$. La magnitud de la carga del electrón y también del protón que constituye el núcleo del átomo, es igual a la carga elemental: $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$. Por tanto:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} = \left(9.0 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \right) \frac{(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})}{(0.53 \times 10^{-10} \text{ m})^2} = 8.2 \times 10^{-8} \text{ N}$$

Ejemplo 1.3. Considera un pequeño cubo de cobre de 1.0 cm de arista. a) Conociendo que la densidad del cobre es 8.9 g/cm^3 , su masa atómica $1.06 \times 10^{-22} \text{ g}$ y su número atómico 29, determina cuántos electrones y protones hay en el cubo. b) Imagina que los protones y electrones del cubito de cobre pudieran concentrarse separadamente en dos esferitas y que éstas se situaran a una distancia de 100 m una de otra, ¿cuál sería la fuerza de atracción entre ellas? c) ¿Cuál sería dicha fuerza si las esferitas se situaran una en la Tierra y la otra en la Luna, a $3.8 \times 10^8 \text{ m}$ de distancia?





a) Puesto que la densidad del cobre es 8.9 g/cm^3 , la masa de un cubo de 1 cm^3 es:

$$\rho = \frac{m}{V}, m = \rho V = \left(8.9 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right)(1 \text{ cm}^3) = 8.9 \text{ g}$$

Cada átomo tiene una masa de $1.06 \times 10^{-22} \text{ g}$, el número de átomos en el cubito es:

$$\frac{8.9 \text{ g}}{1.06 \times 10^{-22} \text{ g}} = 8.4 \times 10^{22}$$

Tanto el número de protones como el de electrones que tiene cada átomo de cobre es 29, por lo que el número de ellos en el cubo es:

$$(29)(8.4 \times 10^{22}) = 2.4 \times 10^{24}$$

b) La carga elemental es $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$. Por consiguiente, la magnitud de la carga de cada esferita es:

$$q = (2.4 \times 10^{24})(1.6 \times 10^{-19} \text{ C}) = 3.9 \times 10^5 \text{ C}$$

Ya sabes que de por sí 1 C es una carga muy grande, así que la carga anterior es inmensa.

Para calcular la fuerza de atracción que se ejercería entre esferitas con tales cargas situadas a 100 m una de la otra, utilizamos la ley de Coulomb:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} = \left(9.0 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}\right) \frac{(3.9 \times 10^5 \text{ C})(3.9 \times 10^5 \text{ C})}{(100 \text{ m})^2} = 1.4 \times 10^{17} \text{ N}$$

Como comprenderás, ésta es una fuerza increíblemente grande.

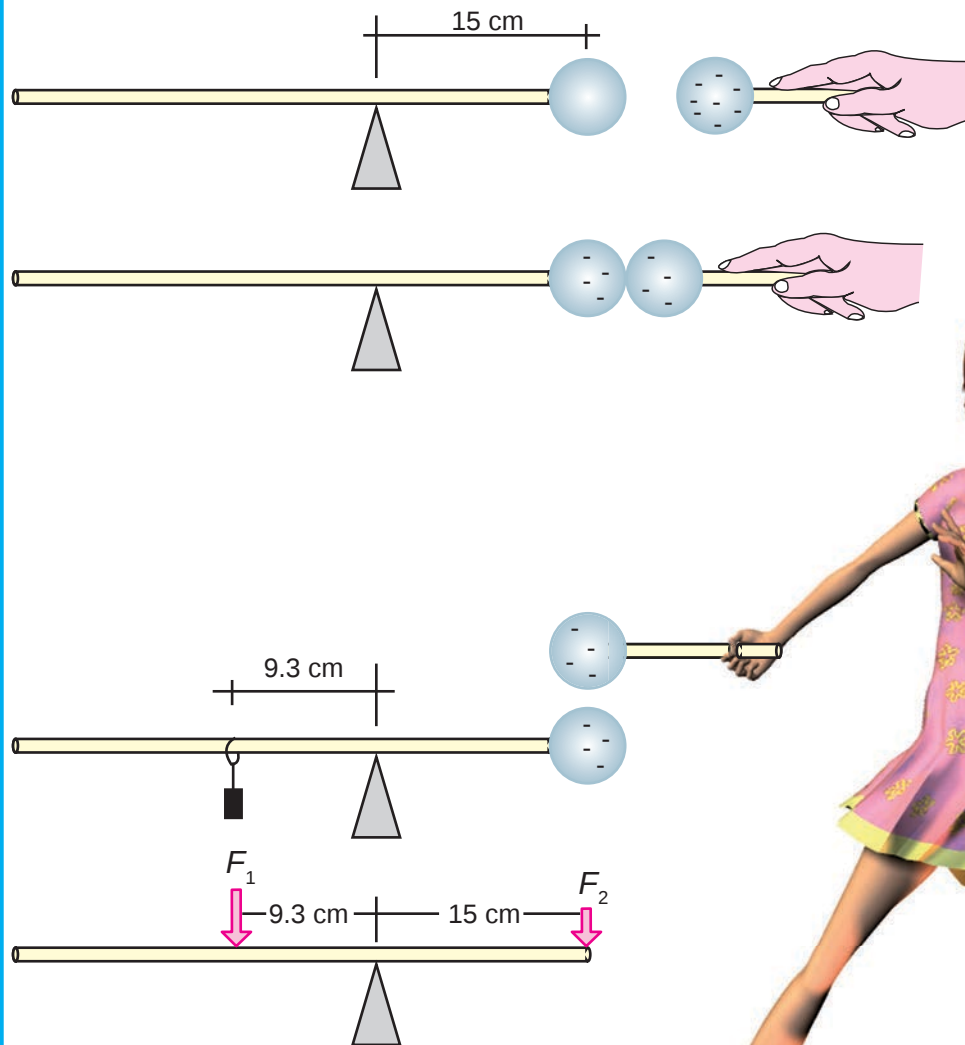
c) El cálculo de la fuerza entre las esferitas si se colocaran una en la Tierra y la otra en la Luna es similar al anterior, solo que ahora la distancia es $3.8 \times 10^8 \text{ m}$.

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} = \left(9.0 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}\right) \frac{(3.9 \times 10^5 \text{ C})(3.9 \times 10^5 \text{ C})}{(3.8 \times 10^8 \text{ m})^2} = 9.5 \times 10^3 \text{ N}$$



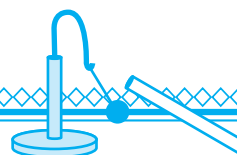
Nota que aún cuando las esferitas se colocaran una de otra a una distancia tan grande como la que hay entre la Tierra y la Luna, la fuerza de atracción entre ellas seguiría siendo grande. Dicha fuerza es aproximadamente igual a la que hay que ejercer para levantar un cuerpo de 1000 kg en la Tierra.

Ejemplo 1.4. En un extremo de una varilla no conductora se fija una pequeña esfera metálica y el conjunto se equilibra horizontalmente sobre un pivote, quedando el centro de la esfera a 15 cm de él. Otra esfera idéntica, sostenida mediante un manguito aislante, se electriza negativamente y luego se pone en contacto por un instante con la que está fija a la varilla. A continuación la esfera del manguito se coloca sobre la del extremo de la varilla, a 5.0 cm de ella. El equilibrio de la varilla se restituyó colocando una carguita de 1.0 g a 9.3 cm del pivote. a) ¿Cuál era la carga de las esferas? b) ¿Cuál el exceso o defecto de electrones en ellas?



a) Primeramente determinemos la fuerza eléctrica que se ejerce entre las esferas. Para ello utilizaremos la ecuación que expresa la condición de equilibrio de rotación de la varilla.





Si como eje para calcular los momentos de las fuerzas, elegimos el que pasa por el pivote y como sentido positivo el del giro contrario a las agujas de un reloj, tenemos:

$$b_1 F_1 - b_2 F_2 = 0$$

F_1 es la magnitud de la fuerza ejercida por la carga que cuelga de la varilla (mg), F_2 la de la fuerza eléctrica de la esfera del manguito sobre la esfera de la varilla, y b_1 y b_2 los brazos de las fuerzas. De la ecuación anterior:

$$F_2 = \frac{b_1}{b_2} F_1 = \left(\frac{9.3 \text{ cm}}{15 \text{ cm}} \right) (0.001 \text{ kg}) \left(9.8 \frac{\text{N}}{\text{kg}} \right) = 0.00608 \text{ N}$$

Ahora utilizamos la ley de Coulomb para calcular la carga de las esferas.

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

Puesto que las esferas son idénticas, cuando se toca con la esfera electrizada a la otra, ambas quedan igualmente cargadas. De ahí que:

$$F_2 = k \frac{qq}{r^2} = k \frac{q^2}{r^2}$$

Resolviendo la ecuación anterior para q :

$$q^2 = \frac{F_2}{k} r^2$$

Extrayendo raíz cuadrada a ambos miembros de la ecuación y sustituyendo los valores:

$$q = r \sqrt{\frac{F_2}{k}} = 1.3 \times 10^{-8} \text{ C}$$

b) Para hallar el número de electrones en exceso que hay en cada esfera, simplemente dividimos la carga de la esfera entre la carga de un electrón.

$$\frac{q}{e} = \frac{1.3 \times 10^{-8} \text{ C}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ C}} = 8.1 \times 10^{10}$$

Este número de electrones en exceso es inmenso, pero de todos modos es muy pequeño comparado con el número total de electrones libres en las esferas.

Ejemplo 1.5. Dos pequeñas esferas idénticas y cargadas con iguales cargas se suspenden de hilos aisladores de 1.0 m de longitud, fijos a un mismo punto. Las esferas quedaron separadas 10 cm. a) ¿Cuál era la fuerza eléctrica entre ellas? b) ¿Cuál era la magnitud de la carga eléctrica de las esferas? c) ¿Qué cantidad de electrones tenían en exceso? La masa de las esferas era 10 g. La masa del hilo podía despreciarse.



En la figura se muestra un esquema de la situación descrita. También se han representado las tres fuerzas que actúan sobre una de las esferas: la de gravedad, la fuerza eléctrica y la tensión del hilo:

a) Para determinar la fuerza entre las esferas aplicamos la condición de equilibrio de traslación a una de ellas. Si se elige un sistema de coordenadas X-Y con el eje Y según la vertical y el X según la horizontal, se tiene:

La suma de las componentes de la fuerzas según X:

$$T \sin \theta - F = 0$$

de donde: $T \sin \theta = F \longrightarrow (1)$

La suma de las componentes según Y:

$$T \cos \theta - F_g = 0$$

$$T \cos \theta = F_g \longrightarrow (2)$$

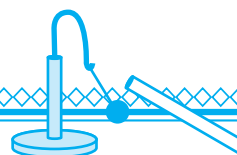
Dividiendo miembro a miembro la ecuación (1) entre la (2):

$$\tan \theta = \frac{F}{F_g}, \text{ de donde}$$

$$F = F_g \tan \theta$$

Hay diferentes variantes para calcular $\tan \theta$. Una de las más rápidas consiste en hallar primero θ a partir del seno del ángulo:

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{\frac{r}{2}}{L} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{r}{2L} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{10 \text{ cm}}{2(100 \text{ cm})} \right) = \sin^{-1}(0.050)$$



De donde $\theta = 2.87^\circ$

Luego se calcula $\tan \theta = 0.050$

Si se emplea una calculadora los dos pasos anteriores pueden hacerse inmediatamente uno a continuación del otro en la propia calculadora.

En realidad, en este caso ni siquiera era necesario emplear una calculadora para hallar la tangente del ángulo. En la situación analizada, el ángulo θ es muy pequeño y, como ya sabes, en tal caso la tangente y el seno son aproximadamente iguales, por lo que se tiene:

$$\tan \theta \approx \sin \theta = \frac{\frac{r}{2}}{L} = \frac{r}{2L} = \frac{10 \text{ cm}}{200 \text{ cm}} = 0.050$$

Observa que el resultado es el mismo que el obtenido anteriormente. Pero recuerda que solo es posible seguir este procedimiento si el ángulo es muy pequeño.

La fuerza eléctrica es, por tanto:

$$F = F_g \tan \theta = (0.010 \text{ kg}) \left(9.8 \frac{\text{N}}{\text{m}} \right) (0.050) = 0.0049 \text{ N}$$

b) Para hallar la carga de las esferas nos valemos de la ley de Coulomb teniendo en cuenta que sus cargas son iguales, es decir, que $q_1 = q_2 = q$:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} = k \frac{q^2}{r^2}$$

$$\text{De donde } q^2 = \frac{F}{k} r^2$$

Por consiguiente, la magnitud de la carga eléctrica de las esferas es:

$$q = r \sqrt{\frac{F}{k}} = 0.10 \text{ m} \sqrt{\frac{0.0049}{9.0 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}}} = 7.4 \times 10^{-8} \text{ C}$$

c) Para hallar cuantos electrones tienen en exceso las esferas, dividimos la carga que poseen entre la carga del electrón, o sea, entre la carga elemental. Dicho número es:

$$\frac{q}{e} = \frac{7.4 \times 10^{-8} \text{ C}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ C}} = 4.6 \times 10^{11}$$

Como en el caso del ejemplo anterior, este número de electrones en exceso es muy grande, pero de todos modos es pequeño comparado con la cantidad total de electrones libres de las esferas.



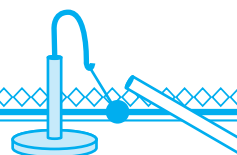
1.2.5 Campo eléctrico.

Hemos examinado la ley fundamental de la interacción entre dos cuerpos cargados en reposo, pero *¿cómo se transmite la acción de un cuerpo sobre otro?*

Las leyes de gravitación y de Coulomb dicen el modo de calcular las fuerzas gravitatoria y eléctrica entre dos partículas, pero no cómo se transmite la acción de una partícula a otra. La experiencia sugiere que para que un cuerpo actúe sobre otro a cierta distancia, debe producir algo que llegue hasta él, o transmitir su acción a través de cierto medio entre ellos, como en el caso de las ondas. En otras palabras, todo parece indicar que un cuerpo no puede actuar sobre otro **a distancia**, sin que intervenga algún intermediario. Pese a ello, el triunfo que representó haber obtenido las leyes de gravitación y de Coulomb sin prestar atención al mecanismo de transmisión de la fuerza y los éxitos alcanzados en la aplicación de estas leyes, durante largo tiempo hizo olvidar a los científicos la búsqueda de un agente transmisor de la fuerza.

Sin embargo, Michael Faraday retomó la cuestión y planteó la hipótesis de que los cuerpos con carga eléctrica no actúan directamente uno sobre otro, sino que cada cuerpo tiene asociado un **campo eléctrico** que se extiende por el espacio y que es ese campo el que actúa sobre el otro cuerpo. Pero a partir de experimentos con cuerpos cargados en reposo era imposible comprobar la hipótesis de Faraday. Por eso esta idea triunfó solo luego de haberse estudiado la interacción entre partículas cargadas en movimiento.

Hoy se sabe que el campo realmente existe. Si se tienen dos cuerpos electrizados, *A* y *B*, a determinada distancia uno del otro (Fig.1.16) y movemos, digamos, el *A* hacia el *B*, éste “siente” el cambio producido en la posición de *A*, pero no instantáneamente, se requiere determinado tiempo para ello. La transmisión hacia *B* del cambio producido en la posición de *A* parece instantánea porque se realiza a una velocidad muy grande, aproximadamente a 300 000 km /s. Sin embargo, es conocido, por ejemplo, que las oscilaciones de los electrones en la antena transmisora de



No, lo hace por mediación del campo eléctrico. Además, si acercamos o alejamos uno de los cuerpos, el otro demora cierto tiempo en “enterarse”.

una nave cerca del planeta Marte se registran en la Tierra solo al cabo de unos 5 min. En este caso la distancia es tan grande, que el tiempo que demora en transmitirse el cambio producido en la antena de la nave a la Tierra, es claramente apreciable.

¿Entonces un cuerpo electrizado no actúa directamente sobre otro?



Fig. 1.16. Dos tiras de acetato electrizadas. Al desplazar la tira A hacia la B, ésta parece “sentir” el cambio producido en la posición de A instantáneamente, pero en realidad para ello se requiere cierto tiempo.

1.2.5.1. Intensidad de campo eléctrico.

Si en el espacio que rodea a un cuerpo electrizado, es decir, en algún punto de su campo eléctrico, situamos una partícula con carga q , entonces, como sabes, sobre la partícula actúa cierta fuerza $\vec{F}$ (Fig. 1.17). Al medir la fuerza colocando alternativamente en el mismo punto partículas con diferentes cargas, se encuentra que la fuerza es proporcional a la carga de las partículas, es decir que $\vec{F}/q = \text{const.}$ Puesto que esta magnitud es constante y no depende de la carga q de la partícula, sino solo del campo, puede ser utilizada para caracterizarlo.

La **intensidad del campo eléctrico** ($\vec{E}$) es igual al cociente entre la fuerza con que actúa sobre una partícula cargada y la magnitud de la carga:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

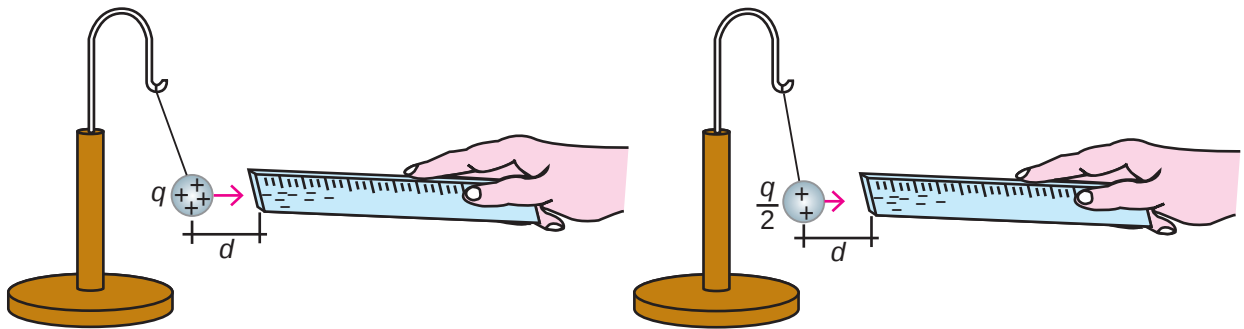
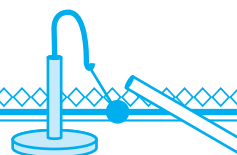


Fig. 1.17. Si en un punto del campo que rodea a un cuerpo cargado, alternativamente se colocan partículas con diferentes cargas se encuentra que la fuerza eléctrica es proporcional a la carga de la partícula, es decir: $\vec{F}/q = \text{const.}$ Esta magnitud se denomina intensidad de campo eléctrico.

Nota que como la fuerza es un vector, la **intensidad de campo** $\vec{E}$ también es un vector, que tiene la misma dirección que la fuerza. Pero ya que la carga q de la partícula sobre la que actúa el campo puede ser positiva o negativa, entonces, según la ecuación $\vec{E} = \vec{F}/q$, si la carga es positiva el sentido del vector intensidad de campo coincide con el de la fuerza y si es negativa, es opuesto. Cabe subrayar que el vector intensidad de campo eléctrico (su magnitud, dirección y sentido) no depende de la carga de la partícula que se coloca en el campo, sino solo de la que lo origina.

En la figura 1.17, ¿cuál será la dirección y sentido del campo $\vec{E}$ asociado a la regla en el punto donde está la partícula? ¿Variaría el sentido del campo si la partícula tuviese carga negativa en lugar de positiva? ¿Qué sucedería con la intensidad de campo si en el punto considerado no hubiese partícula alguna?





Según la ecuación $\vec{E} = \vec{F}/q$, en unidades del Sistema Internacional la intensidad de campo eléctrico puede expresarse en **newton sobre coulomb** (N/C).

La tabla 1.2 muestra algunos valores característicos de intensidades de campo eléctrico.

Tabla 1.2. Algunos valores característicos de intensidades de campo eléctrico.

Campo eléctrico	E (N/C)
En un tubo de luz fluorescente	10^1
En la atmósfera cerca de la Tierra, con buen tiempo	10^2
Cerca de una regla plástica cargada o de un globo frotado con el pelo	10^3
En el tambor cargado de una fotocopidora	10^5
Cuando ocurre una descarga eléctrica en el aire	$> 3 \times 10^6$
Cerca del electrón en un átomo de hidrógeno	5×10^{11}
En la superficie de un núcleo de uranio	3×10^{21}

La distribución del vector intensidad de campo eléctrico en los puntos que rodean a un cuerpo electrizado puede ser muy compleja y por tanto difícil de encontrar una ecuación que la describa. Para ello en principio habría que determinar, para cada punto, la suma de las intensidades de los campos debidos a todas las partículas cargadas del cuerpo. En ciertos casos cuando éstas se distribuyen uniformemente según una forma geométrica regular, como en un alambre recto y largo, en una esfera metálica, o en una extensa lámina metálica plana, es posible hallar fácilmente la suma con ayuda del **cálculo integral**. En otros casos más complejos puede utilizarse una computadora. Cómo hacer esto, lo estudiarás en la formación profesional, aquí nos limitaremos a hallar la intensidad de campo eléctrico alrededor de una **partícula** cargada, que es un caso simple, pero básico para enfrentar los demás.



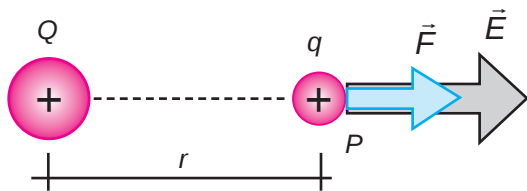


Fig. 1.18. Para hallar la intensidad del campo eléctrico de la partícula con carga Q , se determina la fuerza $\vec{F}$ que ella ejerce sobre la partícula de carga arbitraria q , y se divide entre dicha carga. La dirección de $\vec{E}$ es la misma que la de $\vec{F}$ y si q es positiva, su sentido también.

1.2.5.2. Intensidad de campo eléctrico de una partícula con carga.

Consideremos una partícula con carga Q (Fig.1.18). Para hallar la intensidad de su campo eléctrico en cierto punto P , según la ecuación $\vec{E} = \vec{F}/q$ debemos encontrar la fuerza $\vec{F}$ ejercida sobre otra partícula con carga arbitraria q situada en ese punto y dividirla entre dicha carga. La dirección de $\vec{E}$ será la de $\vec{F}$, y si la carga q es positiva, su sentido también coincide con el de $\vec{F}$.

En la figura 1.18, ¿cómo sería el sentido de la fuerza $\vec{F}$ si Q fuese negativa en lugar de positiva? ¿y el sentido de la intensidad de campo eléctrico $\vec{E}$?

De acuerdo con la ley de Coulomb, la magnitud de la fuerza sobre la partícula con carga q es:

$$F = k \frac{Qq}{r^2}$$

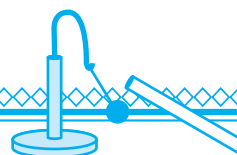
por lo que la magnitud del campo en P es:

$$E = \frac{F}{q} = \frac{k \frac{Qq}{r^2}}{q}$$

$$E = k \frac{Q}{r^2}$$

Nota que la magnitud del campo decrece con el cuadrado de la distancia r a la partícula que lo origina.





Ejemplo 1.6. La superficie de nuestro planeta está rodeada por un campo eléctrico dirigido hacia su interior, cuya magnitud es, en promedio, 150 N/C. Considera que en cierta región en que la intensidad del campo tiene ese valor se tiene un globo con una carga de 2.0×10^{-7} C. a) Determina la fuerza eléctrica ejercida sobre el globo. b) Compara dicha fuerza con la fuerza de gravedad, suponiendo que tiene una masa de 10 g.

a) La magnitud del campo eléctrico es $E = F/q$, donde F es la fuerza ejercida sobre una partícula con carga q situada en el campo. De ahí que para el globo:

$$F = qE$$

Sustituyendo los valores en la ecuación:

$$F = (2.0 \times 10^{-7} \text{ C}) \left(150 \frac{\text{N}}{\text{C}} \right) = 3.0 \times 10^{-5} \text{ N}$$

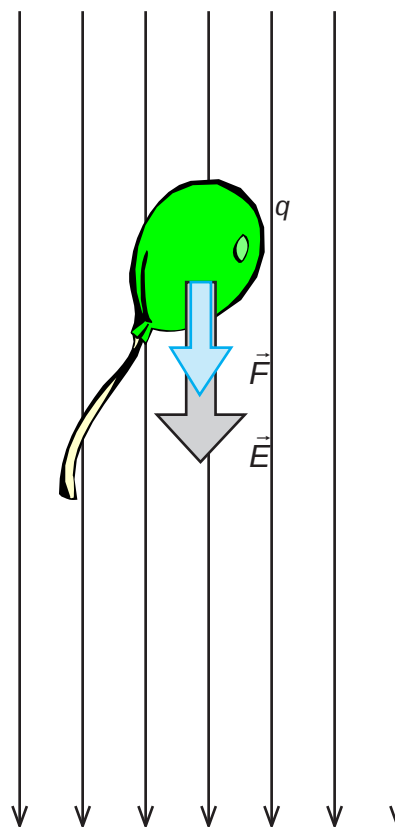
b) La fuerza de gravedad sobre el globo es:

$$F_g = mg = (0.010 \text{ kg}) \left(9.8 \frac{\text{N}}{\text{kg}} \right) = 0.098 \text{ N} \approx 0.10 \text{ N}$$

El cociente entre la fuerza de gravedad y la fuerza debida al campo eléctrico es:

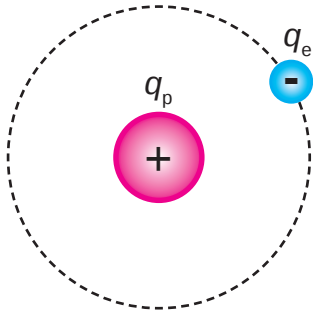
$$\frac{F_g}{F} = \frac{0.10 \text{ N}}{3.0 \times 10^{-5} \text{ N}} = 3.3 \times 10^3$$

La fuerza de gravedad sobre el globo es tres mil veces mayor que la eléctrica.





Ejemplo 1.7. El radio del átomo de hidrógeno es 0.53×10^{-10} m. Determina la magnitud del campo eléctrico originado por su núcleo en las proximidades del electrón.



El núcleo del átomo de hidrógeno es un protón. La magnitud del campo eléctrico originado por él cerca del electrón es:

$$E = \frac{F}{q_e}$$

F es la fuerza ejercida sobre el electrón y q_e la carga de éste. Según la ley de Colulomb, la fuerza es:

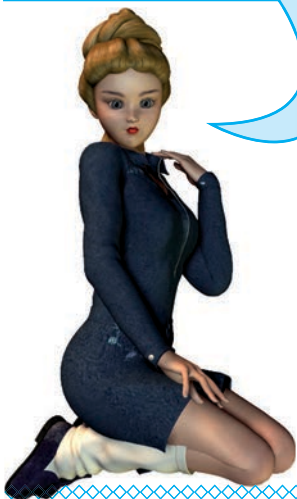
$F = k \frac{q_p q_e}{r^2}$, donde q_p es la carga del protón. Por consiguiente:

$$E = \frac{k \frac{q_p q_e}{r^2}}{q_e} = k \frac{q_p}{r^2} = \left(9 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \right) \frac{1.6 \times 10^{-19} \text{ C}}{(0.53 \times 10^{-10} \text{ m})^2}$$

$$E = 5.1 \times 10^{11} \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

Observa que el valor hallado coincide con el de la tabla 1.2.

¿Cómo representarías la intensidad del campo eléctrico en torno a una partícula con carga negativa?



Podemos tener una representación del campo eléctrico en torno a una partícula cargada, dibujando los vectores intensidad de campo en varios puntos alrededor de la partícula (Fig. 1.19).

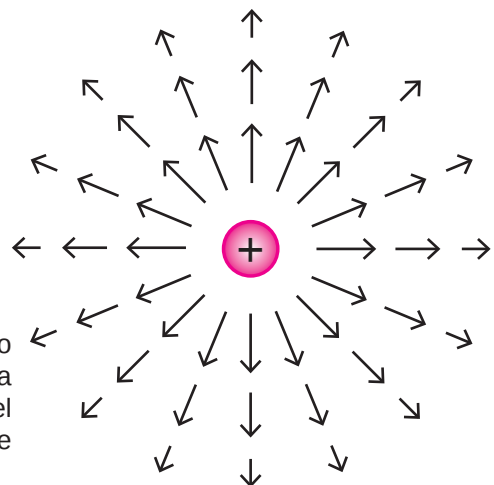
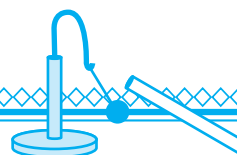


Fig. 1.19. Intensidad del campo eléctrico en torno a una partícula con carga positiva. La intensidad del campo eléctrico es radial y decrece con la distancia.



1.2.5.3. Líneas de campo eléctrico.

La figura 1.19 sugiere describir las características del campo eléctrico por medio de líneas. Michael Faraday suponía que el espacio en torno a cuerpos con carga estaba lleno de una especie de hilos, que denominó líneas de fuerza. En la actualidad tales líneas, generalmente denominadas **líneas de campo eléctrico**, se consideran solo un **recurso útil para visualizar características básicas del campo** alrededor de cuerpos cargados. Ya hemos dicho que la distribución de la intensidad del campo eléctrico en torno a cuerpos electrizados puede ser compleja. Incluso aún cuando sea posible hallar una ecuación que la describa, ésta puede resultar difícil de interpretar a simple vista. En tales casos la representación de las líneas del campo constituye un excelente recurso visual para describir las características del campo.

Las líneas de campo eléctrico son líneas en el espacio, rectas o curvas, tales que: 1) su tangente en cada punto tiene la dirección del vector campo eléctrico en ese punto, 2) la separación entre ellas da idea de la intensidad del campo: donde las líneas estén más unidas, el campo es más intenso y donde estén más separadas, menos intenso.

Así, en la figura 1.20, las líneas del campo son más densas en la superficie A que en la B, lo que indica que en la superficie A la intensidad del campo es mayor. Por otra parte, puesto que en este caso las líneas son curvas, y la intensidad del campo es tangente a ellas en cada punto, significa que en similares puntos de un plano y otro las intensidades de campo no tienen igual dirección.

En la figura 1.21 se muestran las líneas de campo correspondientes a una partícula con carga positiva (a), y con carga negativa (b). Solo se han dibujado las líneas de campo en el plano que está la carga, pero debes tener en cuenta que abarcan todo el espacio alrededor de la partícula. Nota que las líneas se separan a medida que se alejan de las partículas, lo que indica que la intensidad de campo se va haciendo cada vez menor. Por otra parte, en el caso de la partícula positiva, las líneas están dirigidas en

¿Cuál es la importancia que tiene la representación del campo eléctrico por medio de líneas de campo?

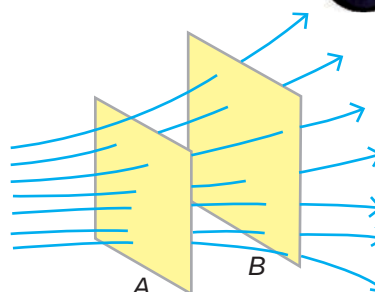


Fig. 1.20. Líneas de campo eléctrico. En el plano A la intensidad del campo es mayor que el B. En puntos similares de los planos, el campo no tiene la misma dirección.



el sentido que se alejan de la partícula, mientras que en el caso de la negativa, hacia ella.

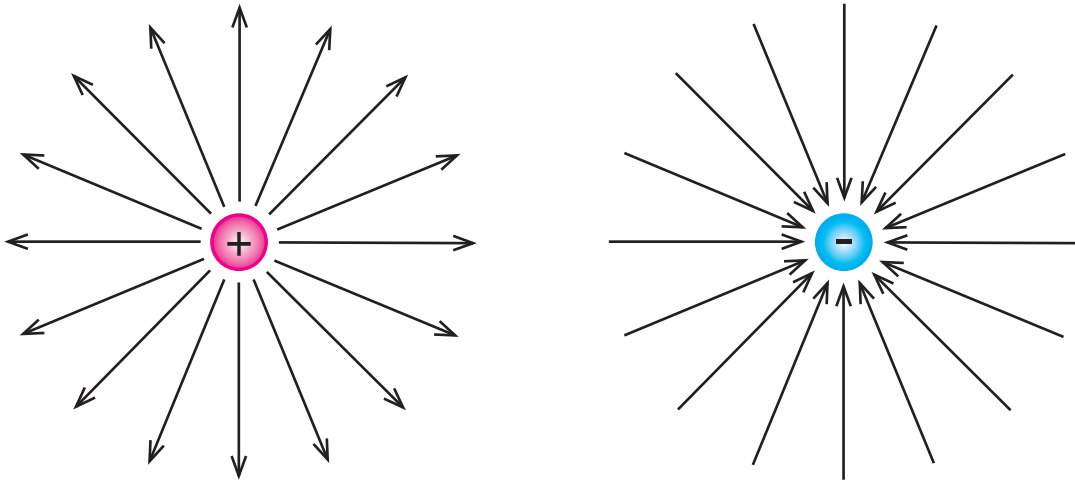


Fig. 1.21. Líneas de campo eléctrico en torno a una partícula: (a) con carga positiva y (b) con carga negativa. La menor separación entre las líneas a medida que se alejan de las partículas indica que la intensidad del campo decrece con la distancia a ellas.



¿Hasta dónde llegarían las líneas de campo de una partícula cargada, que estuviese de todo cuerpo? Argumenta.

Las líneas de campo pueden hacerse “visibles” utilizando pequeñas porciones alargadas de algún material aislante mezcladas con un líquido viscoso. Al introducir un cuerpo cargado dentro de tal preparación, las porciones de material se alinean haciendo “visibles” las líneas de campo. La figura 1.22 muestra cómo pequeñas hebras de hilo suspendidas en aceite se alinean alrededor de un conductor cargado.

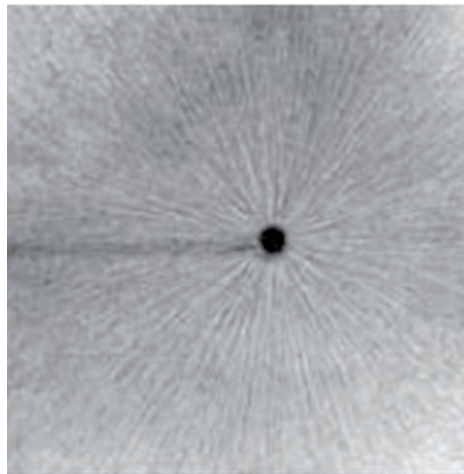
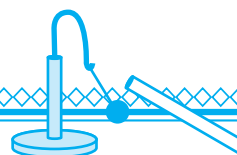


Fig. 1.22. Pequeñas hebras de hilo suspendidas en aceite se alinean alrededor de un conductor cargado.



En la figura 1.23 se ilustran las líneas de campo correspondientes a: (a) dos partículas con cargas de igual magnitud y diferentes signos, (b) dos partículas con cargas de igual magnitud y signo, (c) una lámina extensa con carga positiva y (d) dos láminas extensas paralelas entre sí con cargas de igual magnitud y diferente signo. Los dos últimos casos tienen especial interés. Observa que en (c) las líneas del campo son perpendiculares a la lámina y están igualmente agrupadas. Esto indica que en cualquier punto frente a la lámina alejado de sus bordes, la magnitud, dirección y sentido del campo son los mismos. En (d) ocurre lo mismo en la región entre las láminas, y en el exterior el campo es débil. Mientras menor sea la distancia entre las dos láminas comparada con sus dimensiones, más débil será el campo en el exterior de ellas.

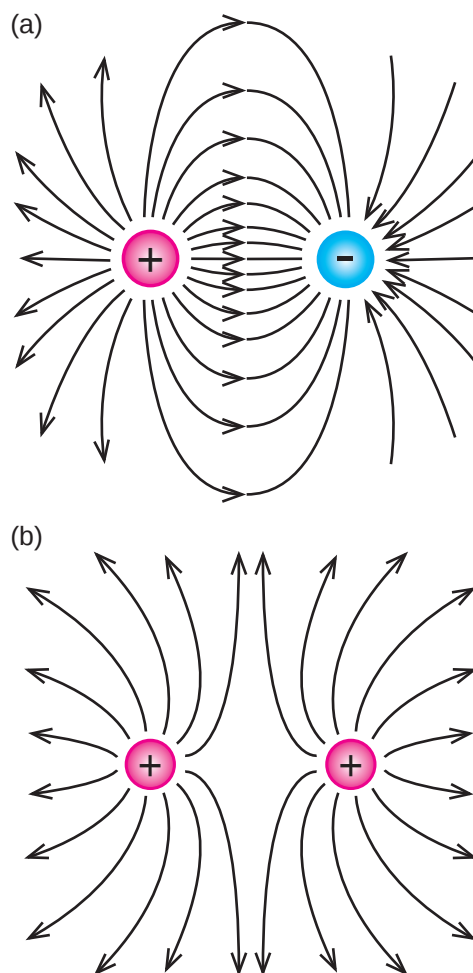
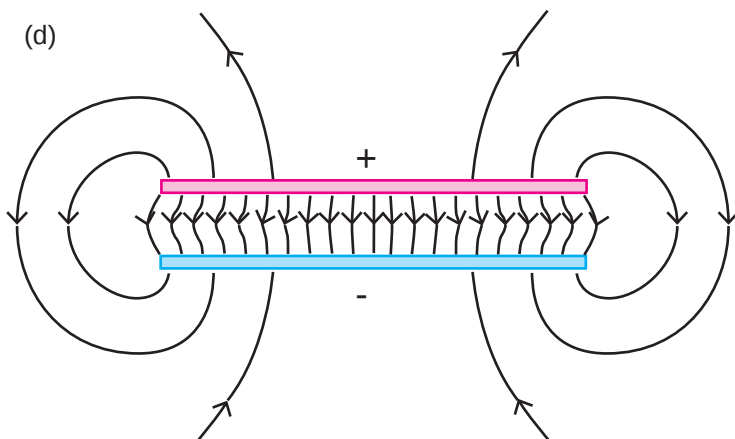
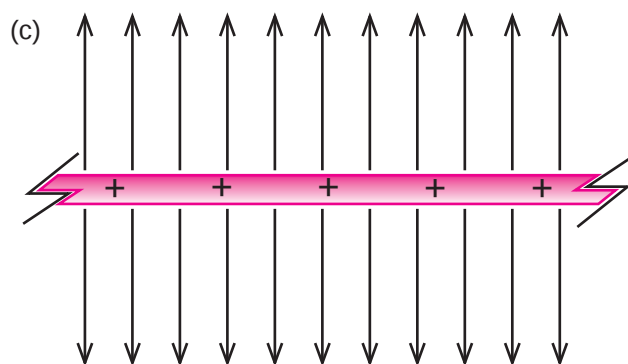


Fig. 1.23. Líneas de campo eléctrico correspondientes a: (a) dos partículas con cargas de igual magnitud y diferente signo, (b) dos partículas con cargas de igual magnitud y signo, (c) lámina extensa con carga positiva, (d) dos láminas extensas paralelas entre sí, con cargas de igual magnitud y diferente signo.



Que las líneas del campo sean perpendiculares a la lámina cargada de la figura 1.23c parece razonable, pero me resulta difícil aceptar que la magnitud del campo no disminuya con la distancia a la lámina.

El campo cuya magnitud, dirección y sentido son los mismos en todos los puntos del espacio se denomina **homogéneo**.

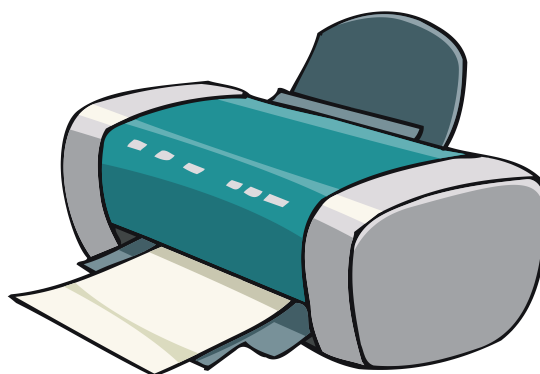
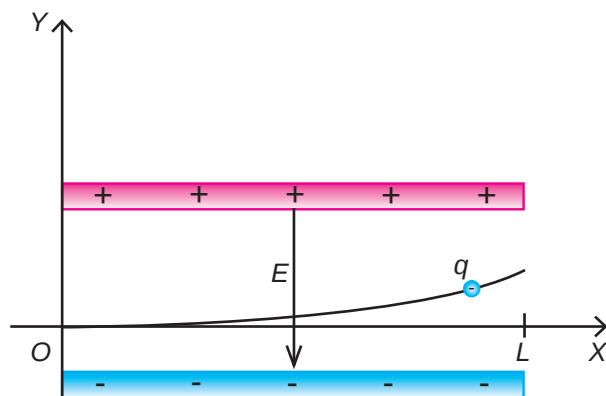
Si disminuyera, entonces las líneas estarían separadas unas de otras al alejarse de la lámina, pero si la extensión de ésta es infinita, ello es imposible.

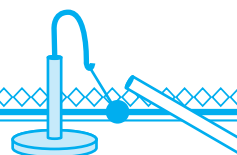


A partir del diagrama de líneas de campo para una lámina extensa cargada (1.23 c), ¿podrías argumentar el hecho de que en el exterior de un sistema formado por dos láminas con cargas de igual magnitud y signos contrarios, el campo es nulo?

Ejemplo 1.8. En una impresora de “chorro de tinta”, mediante un campo eléctrico entre dos placas paralelas horizontales se dirigen con gran precisión minúsculas gotas de tinta hacia el papel, a fin de formar cada uno de los caracteres. Una letra típica requiere unas 100 gotitas, pero las impresoras modernas pueden producir más de 100 000 cada segundo. Imagina que una gota de masa $1.0 \times 10^{-10} \text{ kg}$, con carga de $1.2 \times 10^{-13} \text{ C}$, penetra en el campo homogéneo entre las placas, de intensidad $1.5 \times 10^6 \text{ N/C}$, con una velocidad inicial horizontal dirigida a lo largo de ellas de 15 m/s . La longitud de las placas es 1.5 cm . a) ¿Qué tiempo demora la gota en salir del campo entre las placas? b) Halla la fuerza eléctrica que actúa sobre la gota y compárala con la fuerza de gravedad sobre ella. d) ¿Qué desviación vertical ha experimentado al salir del campo?

A continuación hemos dibujado un esquema de la situación descrita.





Puesto que la gota representada tiene carga negativa, está sometida a una fuerza eléctrica de sentido contrario a la intensidad del campo. Ya que el campo es homogéneo, dicha fuerza es constante durante todo el movimiento de la gota. El movimiento puede por tanto imaginarse como una composición de dos movimientos rectilíneos, uno según X, con velocidad constante y otro según Y, con aceleración constante.

a) Para hallar el tiempo t empleado por la partícula en recorrer la distancia horizontal L y salir del campo, utilizamos la ecuación del movimiento uniforme:

$$v_x = \frac{L}{t}$$

$$\text{de donde, } t = \frac{L}{v_x} = \frac{1.5 \times 10^{-2} \text{ m}}{15 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0.0010 \text{ s}$$

b) La magnitud de la fuerza eléctrica que actúa sobre la partícula es:

$$F = qE = (1.2 \times 10^{-13} \text{ C}) \left(1.5 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{C}} \right) = 1.8 \times 10^{-7} \text{ N}$$

Por su parte, la de la fuerza de gravedad sobre la partícula es:

$$F_g = mg = (1.0 \times 10^{-10} \text{ kg}) \left(9.8 \frac{\text{N}}{\text{kg}} \right) = 9.8 \times 10^{-10} \text{ N}$$

De modo que:

$$\frac{F}{F_g} = \frac{1.8 \times 10^{-7} \text{ N}}{9.8 \times 10^{-10} \text{ N}} = 184$$

Como puedes ver, pese a que la fuerza eléctrica es muy pequeña comparada con las fuerzas que nos relacionamos habitualmente, de todos modos es mucho mayor que la de gravedad, unas 184 veces mayor.

c) El desplazamiento vertical de la gota es $\Delta y = \frac{1}{2} a_y t^2$, donde t es el tiempo que demora en salir del campo, hallado ya en el apartado (a). Al calcular la aceleración a_y no tendremos en cuenta la fuerza de gravedad, ya que es pequeña comparada con la fuerza eléctrica. Por tanto:

$$a_y = \frac{F}{m} = \frac{1.8 \times 10^{-7} \text{ N}}{1.0 \times 10^{-10} \text{ kg}} = 1.8 \times 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

De aquí que:

$$\Delta y = \frac{1}{2} a_y t^2 = \frac{1}{2} \left(1.8 \times 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) (0.001 \text{ s})^2 = 9.0 \times 10^{-4} \text{ m} = 0.90 \text{ mm}$$

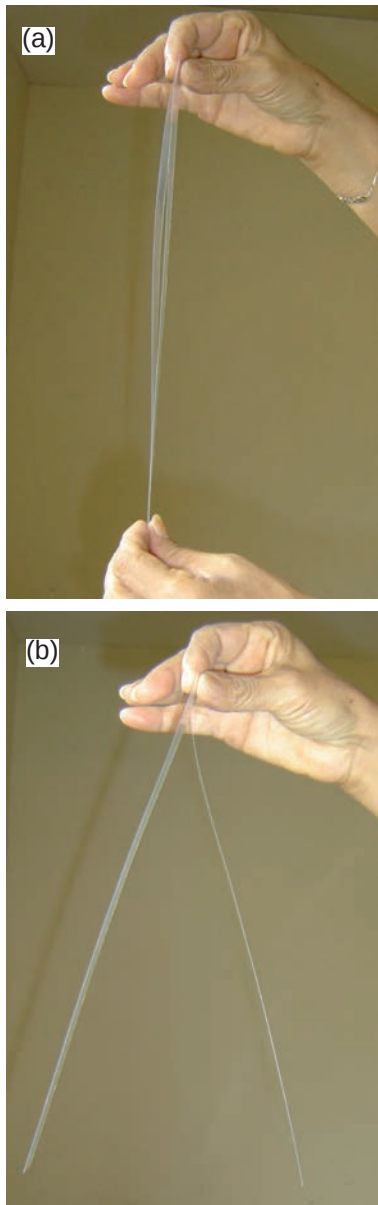


Fig. 1.24. a) Energía potencial eléctrica debida a la interacción entre dos tiras de acetato: (a) las tiras con cargas de igual signo se sostienen unidas, (b) al soltar las tiras, ellas se separan, poniendo de manifiesto que poseían energía debida a la interacción eléctrica.

1.2.6. Potencial y diferencia de potencial.

1.2.6.1. Energía potencial eléctrica.

Si dos tiras de acetato con cargas de igual signo se sostienen verticalmente manteniéndolas unidas por ambos extremos (Fig. 1.24a) y luego se suelta el extremo inferior, ellas se separan por sí solas (Fig.1.24b). Esto pone de manifiesto que el sistema de las dos tiras poseía energía debido a la interacción eléctrica entre ellas. La fuerza de interacción eléctrica, como la de interacción gravitatoria, es **conservativa**, por lo que puede asociársele cierta **energía potencial**.

Un sistema de cuerpos electrizados posee energía potencial debido a la interacción eléctrica entre ellos, denominada *energía potencial eléctrica*.

La energía de interacción entre los electrones y los núcleos atómicos y entre los átomos que forman las moléculas (la denominada energía química), es esencialmente eléctrica. Puesto que en los núcleos atómicos los protones se encuentran muy próximos entre sí, la energía de interacción eléctrica entre ellos es enorme. Precisamente parte de esa energía es la que se transforma en energía térmica en los reactores nucleares.

En Electricidad, lo mismo que en Mecánica, el concepto de energía potencial facilita el análisis de muchas situaciones. Como recordarás, la expresión de la energía potencial está determinada por la expresión de la fuerza. Así, por ejemplo, la fuerza gravitatoria cerca de la superficie de la Tierra es $F_g = mg$ y la energía potencial gravitatoria mgy ; la fuerza elástica es $F = -kx$ y la energía potencial elástica $\frac{1}{2}kx^2$. Como estudiaste en Mecánica, la expresión de la energía potencial asociada a una fuerza puede obtenerse teniendo en cuenta que el trabajo realizado por la fuerza es de igual magnitud y signo opuesto que la variación de energía potencial:

$$W_{FC} = -\Delta E_p$$

Nos limitaremos a hallar la expresión de la energía potencial eléctrica en una situación muy simple, cuando se tiene una partícula cargada en un **campo eléctrico homogéneo**, digamos, entre dos láminas extensas con cargas de signos contrarios (Fig.1.23c). En ese caso, como sabes, la fuerza que actúa sobre la partícula es constante.

Consideremos las dos láminas (Fig. 1.25) y elijamos el origen de la coordenada X sobre la lámina negativa. Supongamos ahora que se tiene una partícula con carga positiva en el punto 1 y determinemos el trabajo realizado por el campo cuando se desplaza hasta el punto 2, sobre la lámina negativa. En este caso el trabajo se halla simplemente multiplicando los módulos de la fuerza y el desplazamiento:

$$W_{Fe} = Fx = qEx$$

Por su parte, la variación de la energía potencial es:

$$\Delta E_p = E_p(0) - E_p(x)$$

siendo $E_p(x)$ la energía potencial cuando la partícula está en la posición x y $E_p(0)$ cuando está en el origen de coordenada. En consecuencia, se tiene:

$$qEx = -[E_p(0) - E_p(x)] = E_p(x) - E_p(0)$$

Resolviendo para $E_p(x)$:

$$E_p(x) = qEx + E_p(0)$$

Como puedes apreciar, el valor de la energía potencial cuando la partícula está en la posición x depende no solo de dicha posición, sino también del valor que tenga la energía potencial en cierto punto, por ejemplo en el origen de coordenada. Sin embargo, del curso de Mecánica ya sabes que **cundo se trata de la energía potencial, lo importante son sus variaciones**. De modo similar que el origen de coordenada, **el nivel cero de energía potencial se escoge donde más convenga**. Así, en el caso que estamos examinando, si elegimos el nivel cero en el origen de coordenada, es decir, sobre la lámina negativa, se tiene

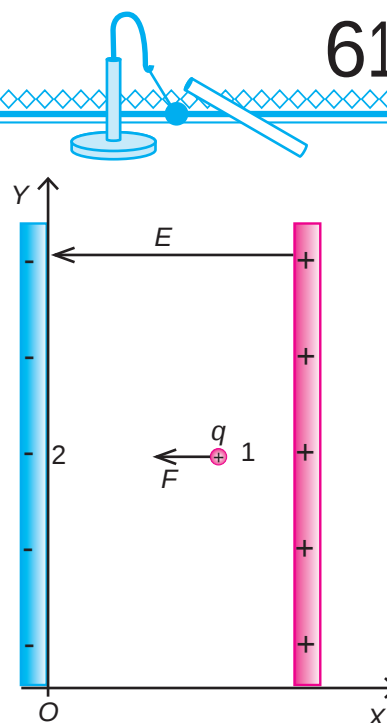


Fig. 1.25. Partícula con carga positiva que se desplaza en el campo eléctrico homogéneo entre dos placas con cargas de signos opuestos.

En la figura 1.25, ¿será positivo o negativo el trabajo realizado por el campo sobre la partícula? Argumenta.





$E_p(0) = 0$, y la expresión de la energía potencial queda, sencillamente:

$$E_p(x) = qEx$$

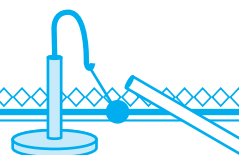
Tal vez a primera vista no te percastes del parecido entre esta ecuación y la de la energía potencial gravitatoria cerca de la superficie de la Tierra, $E_p(y) = mgy$, utilizada en el curso de Mecánica, pero si la examinas detenidamente verás que son similares. El lugar de la masa m ahora lo ocupa la carga q , el de la intensidad de la gravedad g , lo ocupa la intensidad del campo eléctrico y el de la posición y lo ocupa la posición x . La similitud te parecerá todavía mayor si giras el libro un ángulo de 90° en sentido contrario al de las manecillas de un reloj. La situación recuerda el caso de una partícula que cae desde cierta altura bajo la acción de la fuerza de gravedad. Sin embargo, a diferencia de la masa m la carga q puede ser tanto positiva como negativa. Si la partícula colocada entre las placas fuese negativa en lugar de positiva, entonces la expresión de la energía potencial sería:

$$E_p(x) = -qEx$$

En la figura 1.25, ¿aumenta o disminuye la energía potencial cuando la partícula se desplaza de 1 a 2?, ¿y si la carga de la partícula fuese negativa? Argumenta.



¿Cuál sería la analogía gravitatoria de una partícula con carga positiva moviéndose entre las placas de la figura 1.25 en sentido contrario a la intensidad de campo $\vec{E}$?



Ejemplo 1.9. Imagina que la intensidad del campo eléctrico entre las placas representadas en la figura 1.25 es $1.0 \times 10^4 \text{ N/C}$ y la distancia entre ellas 1.0 cm . Si de la placa negativa se desprende un electrón, ¿con qué velocidad llegará a la placa positiva?

Nota que como la masa del electrón es extremadamente pequeña, la fuerza de gravedad sobre él es insignificante comparada con la eléctrica, por lo que el electrón se moverá hacia la placa positiva siguiendo la dirección de las líneas del campo. No es necesario tener en cuenta la energía potencial gravitatoria. El aumento de su energía cinética se realiza por cuenta de la disminución de la energía potencial eléctrica del sistema:

$$\Delta E_C = -\Delta E_P$$

Si elegimos el origen de la coordenada x en la placa negativa y el nivel cero de energía potencial eléctrica sobre ella, entonces la expresión de la energía potencial es:

$$E_P = -qEx$$

El signo menos se debe a que se trata de un electrón, que posee carga negativa.

Por consiguiente:

$$\frac{1}{2}mv^2 - 0 = -(-qEx - 0) = qEx$$

Resolviendo para v :

$$v^2 = \frac{2qEx}{m}$$

$$v = \sqrt{\frac{2qEx}{m}} = \sqrt{\frac{2(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})\left(1.0 \times 10^4 \frac{\text{N}}{\text{C}}\right)(1.0 \times 10^{-2} \text{ m})}{9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}}} = 5.9 \times 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$



1.2.6.2. Potencial eléctrico.

El ejemplo anteriormente considerado muestra que la energía potencial de una partícula en un campo eléctrico depende de la intensidad $\vec{E}$ del campo y de la carga q de la partícula. Pero si se divide la energía potencial entre la carga de la partícula, es decir, si se halla la **energía potencial por unidad de carga**, entonces la nueva magnitud que resulta es **independiente de la carga de la partícula**, solo depende del campo en el punto dado. Así, por ejemplo, en el caso de la partícula cargada entre las dos placas paralelas (Fig. 1.25), la energía potencial por unidad de carga es:

$$\frac{E_p}{q} = \frac{qEx}{q} = Ex$$

Como puedes ver, en este resultado no aparece la carga q de la partícula que se coloca en el campo.

Por consiguiente, para caracterizar el campo eléctrico, además de la intensidad $\vec{E}$ de campo se dispone de otra magnitud, la energía potencial por unidad de carga.

La energía potencial por unidad de carga en un punto dado del campo eléctrico se denomina *potencial eléctrico*, o simplemente *potencial*:

$$V = \frac{E_p}{q}$$

Ambas magnitudes, $\vec{E}$ y V caracterizan al campo, pero mientras que la primera es un vector, la segunda es un escalar y mientras que la primera caracteriza a la **fuerza** por unidad de carga ejercida por el campo, la segunda caracteriza a la **energía** por unidad de carga.

1.2.6.3. Diferencia de potencial.

De modo similar que la energía potencial, el potencial V en un punto dado del campo depende de dónde se haya elegido el nivel cero para calcularlo. Pero también como

en el caso de la energía potencial, **lo importante no es el potencial en sí mismo, sino su variación ΔV entre dos puntos**, la cual no depende de dónde se haya escogido el nivel cero.

$$\Delta V = V_2 - V_1 = \frac{E_{P2}}{q} - \frac{E_{P1}}{q} = \frac{E_{P2} - E_{P1}}{q} = \frac{\Delta E_P}{q}$$

es decir:

$$\Delta V = \frac{\Delta E_P}{q}$$

En palabras:

La diferencia de potencial (también denominada tensión y voltaje) entre dos puntos del campo es igual a la variación de la energía potencial por unidad de carga que tiene lugar al desplazar una partícula cargada entre los puntos.

Teniendo en cuenta que el trabajo realizado por el campo es $W_{Fe} = -\Delta E_P$, la diferencia de potencial con frecuencia también se escribe:

$$\Delta V = \frac{W_{Fe}}{q}$$

A modo de ejemplo hallemos la expresión de la diferencia de potencial entre dos placas paralelas con cargas de signo contrario (Fig. 1.26). Como hemos visto, la energía potencial al colocar una partícula de carga q en el campo entre las placas es $E_P = qEx$, por lo que la diferencia de potencial $V_B - V_A$ entre las placas es igual a la variación de energía potencial por unidad de carga al desplazar la partícula de 1 a 2:

$$\Delta V = \frac{\Delta E_P}{q} = \frac{E_{P2} - E_{P1}}{q} = \frac{qEd - 0}{q} = Ed$$

donde d es la separación entre las placas.

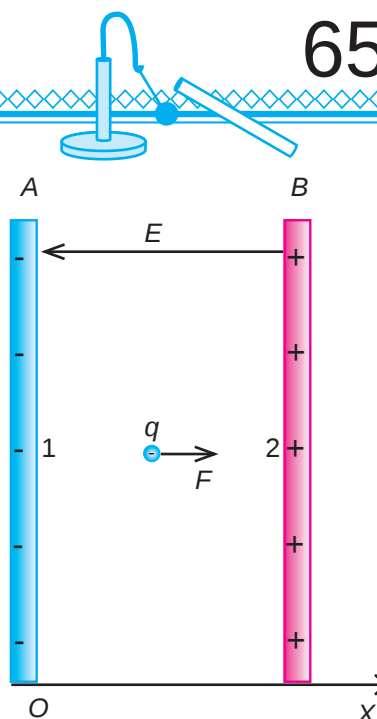


Fig. 1.26. La diferencia de potencial $V_B - V_A$ entre las placas representadas es igual a la variación de energía potencial por unidad de carga al desplazar la partícula cargada de 1 a 2.

En el texto se halló la diferencia de potencial $V_B - V_A$ para las placas de la figura 1.26. ¿Y cuál será la diferencia de potencial $V_A - V_B$?





Alessandro Volta (1745-1827). Profesor de Física y gran experimentador italiano. Es conocido, sobre todo, por la invención en 1800 del primer generador de corriente eléctrica continua, la pila voltaica.

También podía haberse hallado la diferencia de potencial a partir de la ecuación en que interviene el trabajo realizado por el campo. Así, al desplazar la partícula de 1 a 2, dicho trabajo es $W_{Fe} = -qEd$, por lo que al sustituir este resultado en la ecuación se tiene:

$$\Delta V = -\frac{W_{Fe}}{q} = -\frac{-qEd}{q} = Ed$$

Puesto que tanto el potencial como la diferencia de potencial representan energía por unidad de carga, la unidad del sistema internacional en que se miden es el **joule sobre coulomb** (J/C). Esta unidad recibe un nombre especial, **volt**, o **voltio** (V), en honor a Alessandro Volta, quien en el año 1800 inventó el primer generador de corriente continua.

Utilizando el *voltio*, es posible expresar la unidad de intensidad de campo eléctrico ya conocida, N/C, de otro modo. Así, puesto que:

$$1 \text{ V} = 1 \frac{\text{J}}{\text{C}} = 1 \frac{\text{Nm}}{\text{C}} = 1 \frac{\text{N}}{\text{C}} \text{m}, \text{ se tiene que: } 1 \frac{\text{N}}{\text{C}} = 1 \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

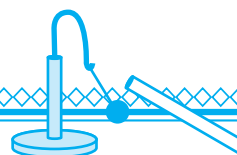
De modo que es equivalente expresar la intensidad de campo eléctrico en N/C o en V/m.

Ejemplo 1.10. Luego de frotar fuertemente con papel una regla plástica, se colocó paralela a una superficie metálica plana y se aproximó poco a poco a ella. Cuando la distancia era de 0.5 cm, saltó una chispa entre las superficies. Considera que el campo entre ellas era homogéneo. a) Estima la intensidad del campo eléctrico entre las superficies. b) Halla la diferencia de potencial entre ellas.

a) Según la tabla 1.2, para que ocurra una descarga eléctrica entre las superficies la intensidad del campo debe ser por lo menos de $3 \times 10^6 \text{ N/C}$ (o V/m).

b) Como se supone que el campo entre las superficies es homogéneo, entonces la diferencia de potencial es $\Delta V = Ed$, donde d es la distancia entre las superficies. Por tanto, la diferencia de potencial es, por lo menos:

$$\Delta V = Ed = \left(3 \times 10^6 \frac{\text{V}}{\text{m}} \right) (0.5 \times 10^{-2} \text{ m}) = 1.5 \times 10^4 \text{ V}$$



1.2.7. Conductores y dieléctricos en un campo electrostático.

1.2.7.1. Conductores en un campo electrostático.

En el apartado 1.2.2, al explicar cómo se origina la atracción entre un cuerpo electrizado y un cuerpo metálico neutro, ya mencionamos que en los metales, los electrones más exteriores de los átomos han perdido sus enlaces con átomos determinados y no pertenecen a ninguno en particular, se mueven libremente en todas direcciones dentro de una red formada por átomos ionizados positivamente. Por supuesto, tanto los electrones como los iones producen campos eléctricos, pero sus intensidades se compensan mutuamente, dando por resultado una **intensidad de campo eléctrico en el interior del conductor nula**. Pero, ¿y si el conductor se coloca en un campo eléctrico externo?

Cuando se introduce un conductor metálico en un campo eléctrico (Fig. 1.26), los electrones comienzan a moverse en sentido contrario al de las líneas del campo, produciéndose un exceso de ellos en un lado del conductor y un defecto en el lado opuesto. Esto origina un campo eléctrico adicional en el interior del conductor, de sentido opuesto al campo externo, cuya intensidad crece con la acumulación de electrones en un lado del conductor y la carencia en el otro. Este proceso tiene lugar hasta que la magnitud del campo eléctrico originado por este desplazamiento de los electrones se iguala a la del campo externo, con lo cual **la intensidad de campo eléctrico resultante en el interior del conductor se hace nula**. El tiempo que dura el proceso de redistribución de los electrones es del orden de 10^{-16} s, por lo que desde el punto de vista práctico puede considerarse que al introducir el conductor en el campo, se alcanza la situación de equilibrio instantáneamente. **El resultado es el mismo si el conductor que se coloca en el campo no es neutro, sino que está cargado.**

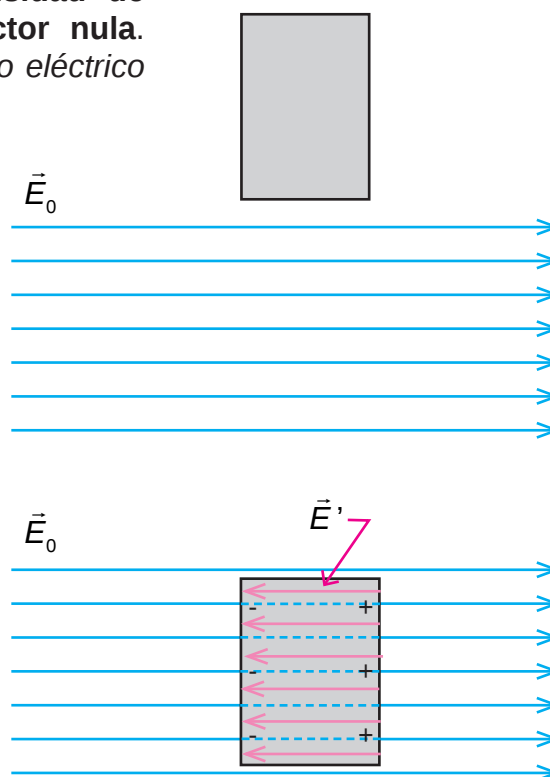


Fig. 1.26. Al introducir una lámina metálica en un campo eléctrico $\vec{E}_0$, se origina un campo eléctrico adicional $\vec{E}'$ que lo compensa, dando por resultado un campo resultante de intensidad nula en el interior de la lámina.



Esclarece por qué si la intensidad del campo eléctrico en el interior de un conductor colocado en un campo eléctrico externo no fuese nula, se violaría la ley de conservación de la energía.



En realidad, un simple razonamiento lleva a la conclusión que la intensidad del campo en el interior de un conductor en un campo eléctrico tiene que ser nula: de no ser así, habría una corriente eléctrica permanente en el conductor, lo que violaría la ley de conservación de la energía. Por igual razón, podemos estar seguros que **las líneas de campo eléctrico fuera del conductor son, en los puntos de contacto con su superficie, perpendiculares a ella**. De lo contrario la intensidad de campo tendría una componente paralela a la superficie que originaría una corriente permanente.

Las conclusiones anteriores son válidas no solo para un conductor macizo, sino también hueco, como por ejemplo, un cascarón. En resumen:

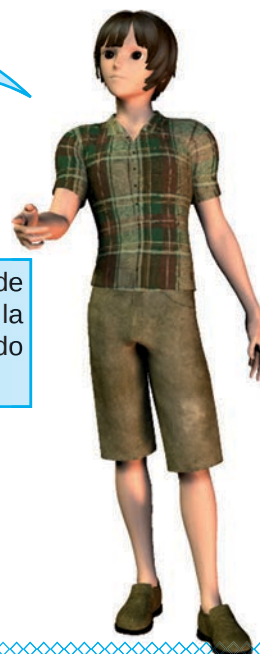
Si un conductor, ya sea neutro o cargado, macizo o hueco, se coloca en un campo eléctrico, la intensidad del campo en su interior es nula y en el exterior las líneas del campo son perpendiculares a la superficie en los puntos de contacto con ella. (Fig. 1.27).

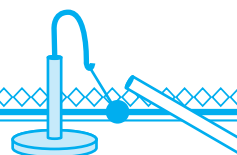


Fig. 1.27. Anillo y lámina, ambos conductores, con cargas eléctricas de diferentes signos. En el interior del anillo no hay líneas de campo, lo que indica que su intensidad es nula. Las líneas de campo son perpendiculares a las superficies de los conductores.

Razonamientos análogos a los anteriores conducen a que **en un conductor electrizado la carga (el exceso o defecto de partículas eléctricas de determinado signo) se distribuye en la superficie, y el interior permanece neutro**.

Argumenta desde el punto de vista microscópico, porqué la carga de un conductor electrizado se distribuye en su superficie.





El hecho de que en el interior de los conductores huecos el campo electrostático sea nulo, se emplea en la denominada **protección electrostática**. Así, para que ciertos dispositivos, como por ejemplo, discos duros y memorias, no sean dañados por campos eléctricos, suelen empacarse en bolsas metálicas. En el interior de la bolsa la intensidad del campo siempre es cero. Al hacer referencia a casos como éstos suele decirse que los dispositivos se han colocado en un “cubo, o jaula de Faraday”, ya que fue Michael Faraday el primero en realizar experimentos a fin de comprobar que en el interior de un conductor la intensidad del campo es nula. Faraday construyó una gran caja cubierta de metal, la colocó sobre soportes aislantes y se introdujo en ella con diversos dispositivos. Pese a que la caja fue tan intensamente cargada que de su exterior saltaban chispas, le fue imposible detectar la presencia de campo eléctrico en su interior. En la figura 1.28 se muestra una versión moderna del experimento.



Fig. 1.28. Versión moderna de la “Jaula de Faraday”.

Lo dicho acerca del campo en un conductor lleva a la conclusión de que en el caso de una esfera conductora con carga, hueca o maciza, las líneas de campo en su exterior, por ser perpendiculares a su superficie, son radiales (Fig. 1.29). Y esto a su vez sugiere, que la intensidad de campo en su exterior es como la de una partícula de igual carga que la esfera, situada en el lugar que ocupa su centro.

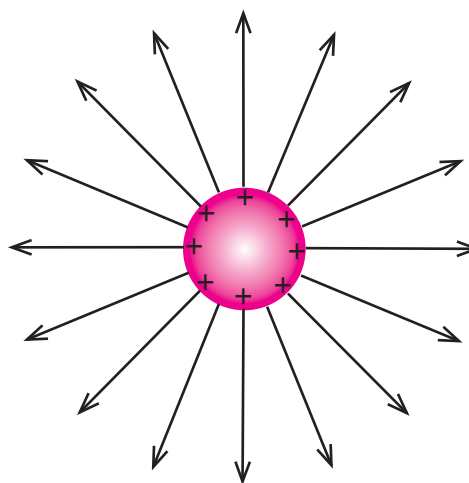


Fig. 1.29. En una esfera conductora, hueca o maciza, la carga se distribuye uniformemente en su superficie. Las líneas de campo son radiales.



¿Por qué en el interior de la esfera de la figura 1.29 no se han dibujado líneas de campo?

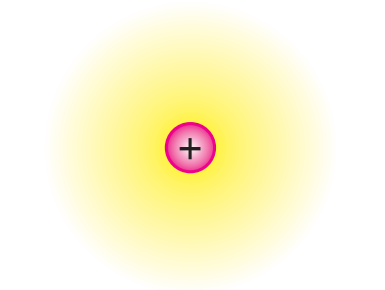


Fig. 1.30. Esquema de un átomo neutro. Los electrones forman una nube, de carga negativa, en torno al núcleo con carga positiva. Los centros de carga negativa y positiva coinciden.

¿Qué sucede con la polarización de un dieléctrico polar si: a) aumenta la intensidad del campo eléctrico externo, b) aumenta la temperatura?



1.2.7.2. Aisladores en un campo electrostático.

En los aisladores, comúnmente denominados en Física **dieléctricos**, los electrones están fuertemente enlazados a los átomos. Por eso, a diferencia de lo que ocurre en los conductores, no pueden moverse libremente entre las moléculas, o átomos. Se distinguen dos tipos de dieléctricos: **polares** y **no polares**.

1.2.7.2.1. Dieléctricos polares.

Como sabes del curso de Química, en los átomos los electrones pueden ser representados por una nube de carga negativa en torno al núcleo con carga positiva (Fig.1.30). Los centros de carga negativa y positiva coinciden y el átomo en conjunto es neutro.

Sin embargo, cuando los átomos forman moléculas, en muchos casos la distribución de la carga eléctrica deja de ser simétrica y los centros de carga negativa y positiva de la molécula no coinciden. Se dice entonces que la molécula es un **dipolo eléctrico** y que el dieléctrico es un **dieléctrico polar**. Ejemplos de moléculas polares son la de agua y las de los alcoholes.

En un dieléctrico polar las moléculas están orientadas caóticamente (Fig. 1.31a) y por eso, en cada porción suya que contenga gran número de ellas la carga eléctrica en promedio es nula, el dieléctrico es neutro. Por igual razón, la intensidad de campo eléctrico en el interior del dieléctrico en promedio también es nula. Pero si el dieléctrico se coloca en un campo eléctrico (Fig. 1.31b), entonces dicho campo actúa sobre cada una de sus moléculas con dos fuerzas, una sobre su parte negativa y otra sobre la positiva. Estas fuerzas producen un **momento de fuerza** que tiende a orientar los dipolos en la dirección del campo. Como resultado de esto, aunque ligada a las moléculas, en la superficie del dieléctrico aparece cierta carga eléctrica. Así, en la figura 1.31b, en la superficie del dieléctrico que está a la derecha prevalece la carga positiva y en la que está a la izquierda, la negativa.

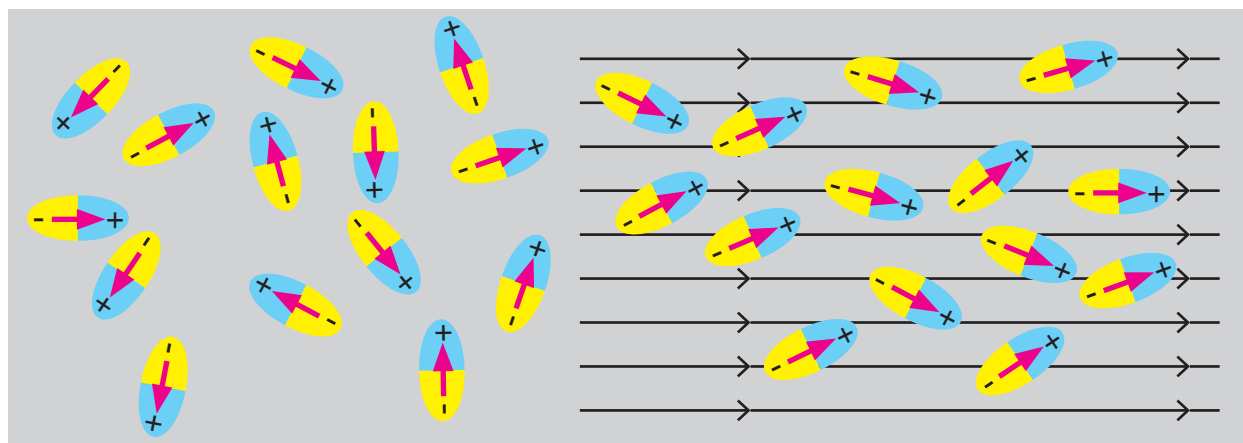
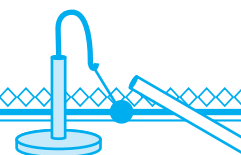


Fig. 1.31. Esquema de las moléculas en un dieléctrico polar. (a) Las moléculas están orientadas caóticamente. (b) Al colocar el dieléctrico en un campo eléctrico, sus moléculas tienden a orientarse en la dirección del campo. En la superficie del dieléctrico, que está a la derecha, prevalece la carga positiva y en la que está a la izquierda, la negativa.

1.2.7.2.2. Dieléctricos no polares.

Los **dieléctricos no polares** están constituidos por átomos o moléculas en que los centros de las distribuciones de carga negativa y positiva coinciden. Pero al ser introducidos en un campo eléctrico sus átomos o moléculas se deforman, polarizándose (Fig. 1.32a). Ejemplos de estos dieléctricos son los gases inertes, el oxígeno, el hidrógeno y el polietileno. Los átomos o moléculas polarizados por el campo se orientan en la dirección de éste (Fig. 1.32b) y, como en los dieléctricos polares, en la superficie de uno de los lados del dieléctrico predomina la carga eléctrica positiva, mientras que en la opuesta, la negativa.

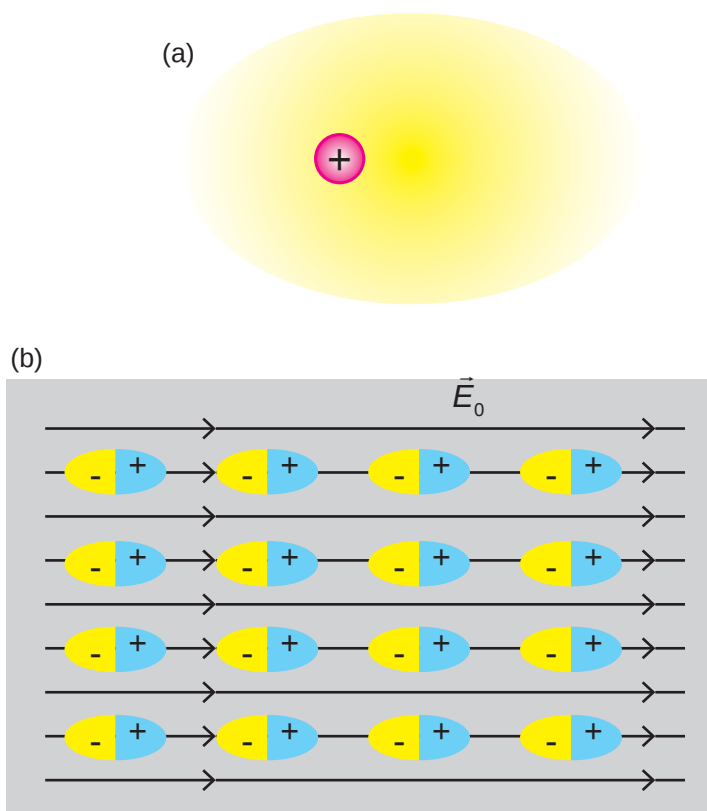


Fig. 1.32. a) Cuando un átomo es sometido a un campo eléctrico, la nube electrónica que rodea el núcleo se distorsiona y los centros de carga negativa y positiva ya no coinciden. b) Los átomos o moléculas polarizados se orientan en la dirección del campo.



Las cargas eléctricas que aparecen en las superficies opuestas de ambos tipos de dieléctricos al ser colocados en un campo eléctrico, originan una intensidad de campo $\vec{E}'$ contraria a la intensidad $\vec{E}_0$ del campo externo. Como consecuencia de esto, la intensidad resultante del campo en el interior del dieléctrico disminuye ($E = E_0 - E'$). El grado en que disminuye depende del dieléctrico y se mide por medio de una magnitud denominada **constante dieléctrica** (ϵ):

$$\epsilon = \frac{E_0}{E}$$

¿A qué se deberá que a 25° C el agua tiene menor constante dieléctrica que a 20° C?



En la tabla 1.3 se dan los valores de las constantes dieléctricas de algunos materiales. También aparece la **rigidez eléctrica**, que es una medida del valor máximo de la intensidad de campo que puede soportar el dieléctrico antes de que ocurra su “ruptura”, es decir, que deje conducir.

Lo anterior significa que las ecuaciones hasta ahora obtenidas deben ser modificadas cuando se trata de cuerpos electrizados colocados en determinado medio y no en el aire. Así, la magnitud del campo eléctrico de una partícula con carga situada en un medio distinto del aire, será ϵ veces menor que en éste y, por tanto, la ecuación para calcularla:

$$E = \frac{k \frac{q}{r^2}}{\epsilon} = \frac{kq}{\epsilon r^2}$$

La fuerza de interacción eléctrica ejercida entre dos partículas con carga situadas en un dieléctrico también decrece ϵ veces, debido a la disminución de la intensidad del campo. Por eso la expresión general de la ley de Coulomb es:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2}$$

La fuerza de interacción eléctrica entre dos cuerpos cargados, a diferencia de la fuerza de interacción gravitatoria, depende, pues, de las propiedades del medio en el cual se encuentran los cuerpos.

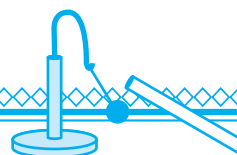


Tabla 1.3. Constante dieléctrica y rigidez eléctrica de algunos materiales.

Material	Constante ϵ	Rigidez eléctrica (V/m)
Aire seco	1.00054	3×10^6
Bakelita	4.9	24×10^6
Poliestireno	2.6	24×10^6
Papel	3.5	16×10^6
Vidrio Pyrex	4.7	14×10^6
Porcelana	6	10×10^6
Etanol	25	----
Agua a 20°C	80.4	----
Agua a 25°C	78.5	----
Titanato de estroncio	300	8×10^6

¿Qué valor podría asignarse a la constante dieléctrica de un metal?



1.2.8. Capacidad eléctrica y condensadores.

En muchas situaciones prácticas, como por ejemplo, al poner en funcionamiento motores eléctricos, al utilizar el flash de una cámara fotográfica, al hacer funcionar un desfibrilador en una ambulancia, o en aceleradores de partículas (Fig. 1.33), se requieren dispositivos que acumulen gran cantidad de carga eléctrica. La cuestión básica que abordaremos en este apartado es:

¿Bajo qué condiciones es posible acumular gran cantidad de carga eléctrica en los conductores?

La función de acumular carga puede ser desempeñada por los **condensadores**, también denominados **capacitores**. Independientemente del procedimiento empleado, para acumular carga en un cuerpo necesariamente hay que transferir carga a otro. Y esto es lo que se hace en los condensadores.

Fig. 1.33. a) Condensador de un motor eléctrico que facilita su puesta en marcha, b) Desfibrilador de una ambulancia que utiliza la energía acumulada en condensadores. c) Banco de condensadores que almacena energía eléctrica para ser utilizada en el acelerador de partículas de FermiLab.



En general, un **condensador** es un sistema de dos conductores aislados del exterior, de uno de los cuales se ha transferido carga al otro.

Un ejemplo clásico y muy simple es el formado por dos láminas metálicas situadas una frente a otra (Fig. 1.34a). Precisamente el símbolo utilizado para representar a los condensadores corresponde a este caso. Y uno de los procedimientos más comunes de trasladar electrones de una de las láminas a la otra, consiste en utilizar un circuito formado por una batería y un interruptor (Fig. 1.34b). Al cerrar el interruptor la batería carga las láminas y, al abrirlo, éstas quedan aisladas de la batería.

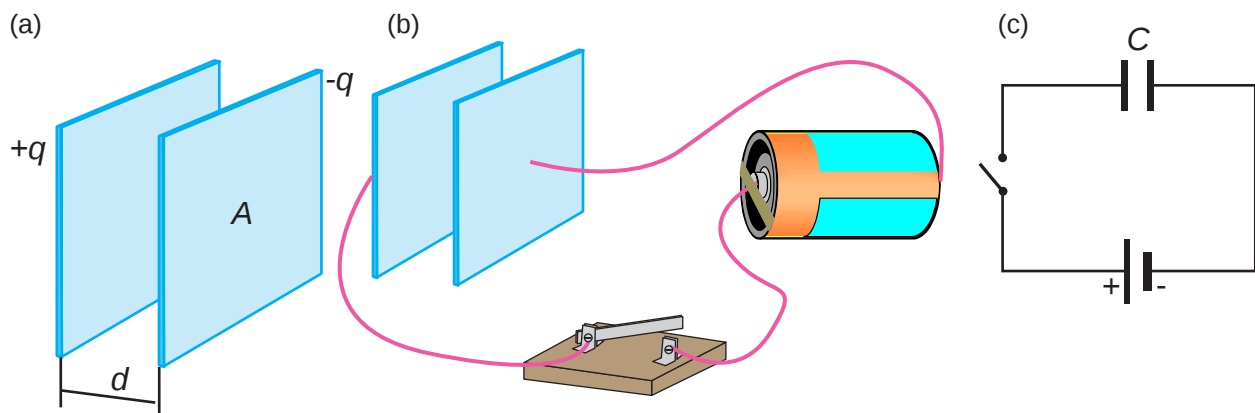


Fig. 1.34. (a) Condensador simple formado por dos láminas metálicas aisladas del exterior, de una de las cuales se han pasado electrones a la otra (b) Uno de los procedimientos más comunes de cargar un condensador es utilizando una batería. (c) Diagrama del circuito.

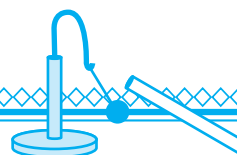


Nota que una lámina se carga negativamente y la otra positivamente, pero que la magnitud de la carga de cada una es la misma. Como no hay que distinguir entre la magnitud de la carga de una lámina y la otra, al referirse a ella sencillamente se habla de “la carga del condensador”.

¿En qué ley se fundamenta la afirmación del texto de que la magnitud de la carga eléctrica de las láminas de la figura 1.34 es la misma? Explica.

Experimentalmente se encuentra que la magnitud de la carga q de un condensador es proporcional a la diferencia de potencial ΔV entre sus láminas:

$$q = C\Delta V$$



La constante C solo depende de las características del condensador: forma de los conductores, distancia que los separa, dieléctrico entre ellos. Dicha constante se denomina **capacidad del condensador** y expresa la **carga eléctrica por voltio que puede acumular**.

De este modo, **la capacidad eléctrica de un condensador es igual al cociente entre su carga y la diferencia de potencial entre sus terminales:**

$$C = \frac{q}{\Delta V}$$

En realidad, lo más probable es que un sistema de dos láminas como el de la figura 1.34, colocado sobre una mesa, no pueda considerarse aislado. Posiblemente sus láminas cargadas interactúen eléctricamente con los objetos que las rodean, lo cual modificaría la capacidad eléctrica del sistema cada vez que variaran dichos objetos. Pero la distancia entre las láminas de los condensadores empleados en la práctica son mucho menores que la del condensador de la figura. Por eso, si bien entre sus láminas la intensidad del campo es considerable, en el exterior es prácticamente nula y su interacción con los objetos que lo rodean es despreciable, comportándose como aislado.

Según la ecuación $C = q / \Delta V$, la unidad de capacidad eléctrica es 1 coulomb / volt (1 C/V). Dicha unidad recibe el nombre especial de **farad**, o **faradio** (F), en honor a Michael Faraday, quien fue el primero en investigar sobre los condensadores.

Puesto que un faradio es 1 C / 1 V y una carga de 1 C es, como sabes, muy grande, entonces el faradio también es una unidad relativamente grande. Por eso en la práctica es muy usual utilizar submúltiplos de ella, por ejemplo, el microfaradio (μF) que es 1×10^{-6} F y el picofaradio (pF), que es 1×10^{-12} F.

Ahora retomaremos la cuestión básica de este apartado: ¿Bajo qué condiciones es posible acumular gran cantidad de carga eléctrica en los conductores?





¿Y que sucede con la capacidad del condensador de la figura 1.34 si sus láminas se acercan después de haberlo desconectado de la batería? Argumenta.



Ante todo nota que como para un condensador determinado C es constante, entonces según la ecuación $C = q / \Delta V$, **aumentando la diferencia de potencial ΔV** puede aumentarse su carga.

Por otra parte, la carga que es capaz de almacenar un condensador de láminas para un voltaje dado, depende del **área** de las láminas, de la **separación** que tienen y del **dieléctrico** entre ellas.

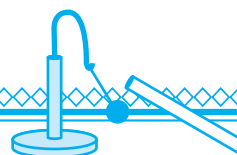
Así, intuitivamente se comprende que mientras mayor sea el área de las láminas del condensador de la figura 1.34, mayor será la carga que puede almacenar. Además, si manteniendo conectado el condensador a la batería, las láminas se acercan entre sí, la intensidad del campo entre ellas aumenta. En efecto, según la ecuación $\Delta V = Ed$, si ΔV se mantiene constante, entonces al disminuir d aumenta E . Y el aumento de E significa que la carga del condensador aumenta.

Los cálculos muestran que, en efecto, la capacidad de un condensador de láminas -o sea, la carga eléctrica que puede almacenar por cada voltio de diferencia de potencial entre sus placas- es:

$$C = \frac{1}{4\pi k} \frac{A}{d}$$

donde k es la constante que interviene en la ley de Coulomb (constante de Coulomb), A el área de las láminas y d la distancia entre ellas.

Por último, veamos cómo un dieléctrico situado entre las láminas del condensador modifica su capacidad. Recordemos que al colocar un dieléctrico entre dos láminas paralelas con carga eléctrica, el campo en su interior disminuye ϵ veces. Por consiguiente, si manteniendo el condensador de la figura 1.34 conectado a la batería se coloca un dieléctrico que llene todo el espacio entre sus láminas, por ejemplo un bloque de poliestireno, la carga de las láminas aumenta hasta que la intensidad del campo vuelve a ser la misma que antes de introducir el dieléctrico. Dicho de otro modo, como $\Delta V = Ed$ y ΔV permanece



constante, E también. La disminución de la intensidad del campo debida a la introducción del dieléctrico es compensada con el aumento de carga en las láminas del condensador. Ésta aumenta ϵ veces, por lo que la capacidad del condensador también.

Anteriormente se afirmó que la capacidad de un condensador depende solo de sus características. Sin embargo, al colocar un dieléctrico entre sus láminas estando conectado a la batería su carga aumenta, pero al hacerlo desconectado de ella no. ¿No es distinta entonces la capacidad en estos casos?

De este modo, la capacidad de un condensador de láminas con un dieléctrico entre ellas es ϵ veces mayor que sin el dieléctrico.

$$C = \frac{\epsilon A}{4\pi k d}$$

Uno de los tipos de condensadores de láminas más comunes consiste en dos tiras de papel de aluminio entre las cuales se coloca otra de papel parafinado. Las tiras pueden tener decenas de centímetros de longitud, pero se enrollan formando un cilindro, con lo cual el condensador queda compacto. En esos condensadores la distancia d entre las láminas es muy pequeña y el área A de ellas puede llegar a ser considerable.

En la electrónica y la microelectrónica los condensadores cumplen otras muchas importantes funciones además de la que hemos examinado, de acumular carga eléctrica. La variedad de tamaños y tipos de condensadores es muy amplia (Fig. 1.35), abarca desde los bancos de condensadores utilizados para almacenar grandes cantidades de carga eléctrica (Fig.1.33c) hasta los microscópicos condensadores incluidos en los circuitos integrados de microprocesadores y memorias de computadoras.



Fig. 1.35. La variedad de tamaños y tipos de condensadores es muy amplia.





Ejemplo 1.11. Cierta condensador está formado por dos tiras de papel de aluminio de 20 m longitud y 2.0 cm ancho, entre las cuales se colocó una tira de papel parafinado ($\epsilon = 2.2$) de espesor 0.1 mm. ¿Cuál es la capacidad eléctrica del condensador?

Para calcular la capacidad del condensador utilizamos la ecuación:

$$C = \frac{\epsilon A}{4\pi k d}$$

El área de las láminas del condensador es:

$$A = (20 \text{ m})(0.020 \text{ m}) = 0.40 \text{ m}^2$$

Por consiguiente:

$$C = \frac{\epsilon A}{4\pi k d} = \frac{(2.2)(0.40 \text{ m}^2)}{4\pi \left(9.0 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}\right)(0.1 \times 10^{-3} \text{ m})}$$

$$C = 9.7 \times 10^{-8} \text{ F} \approx 0.1 \times 10^{-9} \text{ F} = 0.1 \mu\text{F}$$

Ejemplo 1.12. a) ¿Qué área debería tener cada lámina de un condensador como el del ejemplo anterior, para que su capacidad fuese 1 F? b) ¿Qué longitud deberían tener las tiras de aluminio?

a) Una capacidad de 1 F es 1×10^7 veces mayor que la del condensador del ejemplo anterior. Como la capacidad es directamente proporcional al área de las láminas, el área de cada lámina del condensador debería ser 1×10^7 veces mayor, o sea:

$$(1 \times 10^7)(0.40 \text{ m}^2) = 4 \times 10^6 \text{ m}^2 = 4 \text{ km}^2$$

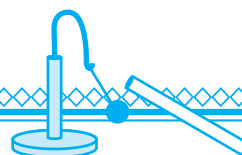
¡Dicha área equivale a la de un cuadrado de 2 km de lado!

b) Si el ancho de las tiras de aluminio es el del ejemplo anterior, entonces el área de ellas debe aumentar a cuenta de la longitud. Ésta debería ser 1×10^7 veces mayor:

$$(1 \times 10^7)(20 \text{ m}) = 2 \times 10^8 \text{ m}$$

¡Esta longitud es unas 15 veces mayor que el diámetro de la Tierra!

Comprenderás que un condensador de 1 F no puede ser como el descrito. Sin embargo, en la actualidad el desarrollo tecnológico es tal que se construyen condensadores de 1 F cuyo tamaño no es mayor que el de un vaso común.



1.2.9. Energía del campo eléctrico.

Según la teoría del campo, **la energía de interacción entre cuerpos con carga eléctrica se almacena en el campo eléctrico originado por ellos**. Un condensador está formado por dos cuerpos cargados que interaccionan entre sí, por lo que el campo eléctrico entre sus láminas almacena energía.

Para convencerse de que un condensador cargado posee energía, basta descargarlo a través de un circuito que contenga un bombillo de pequeño voltaje (Fig. 1.36). El bombillo se enciende por un instante, lo que indica que la energía eléctrica del condensador se ha transformado en otras formas, en particular en energía de radiación luminosa. La energía del condensador procede del trabajo realizado al transferir electrones de una lámina a otra durante el proceso de carga. Este trabajo es efectuado por la batería, la cual transforma energía química de los elementos que la forman en energía eléctrica del condensador.

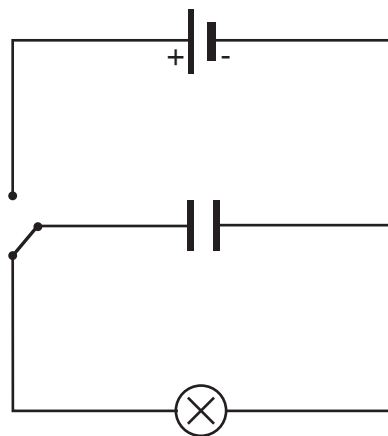


Fig. 1.36. Si se carga un condensador conectándolo a una batería y luego se desconecta de ella y se conecta a un bombillo de pequeño voltaje, éste se enciende por un instante, lo que evidencia que el condensador posee energía.

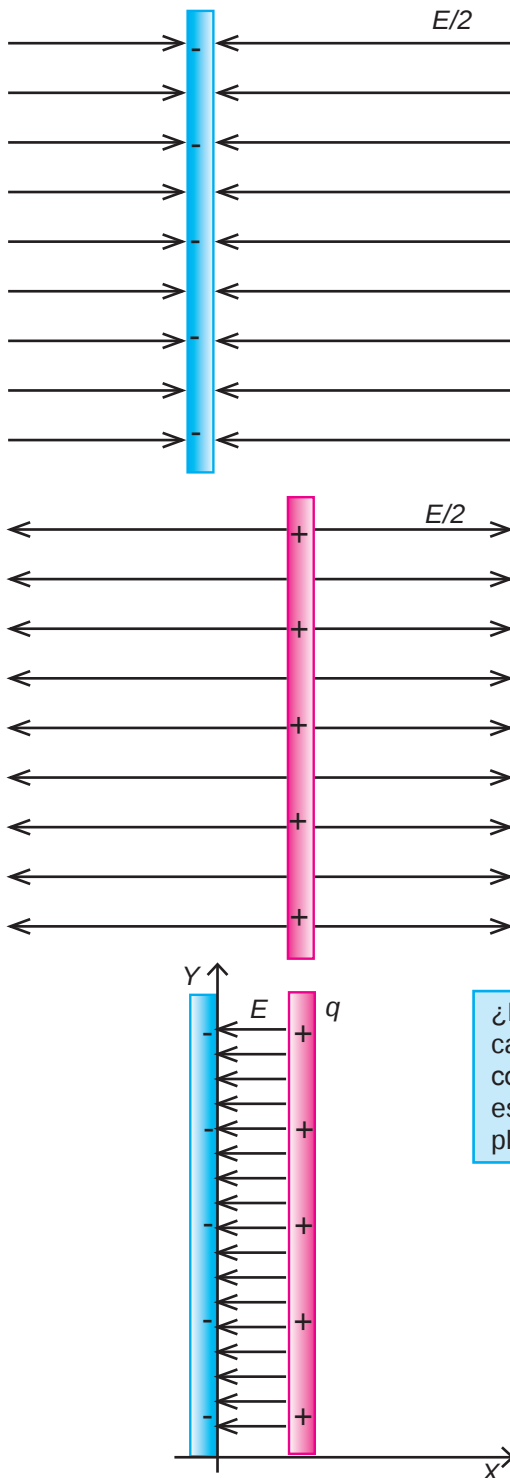


Fig. 1.37. Podemos pensar un condensador de láminas paralelas como una lámina con carga q colocada en el campo homogéneo de magnitud $E/2$ originado por la otra lámina.

En el funcionamiento de los desfibriladores portátiles, flash de cámaras y otros equipos, se utiliza esta propiedad de los condensadores de almacenar energía. El condensador se carga previamente, y luego, al hacer funcionar el equipo, entrega parte de la energía almacenada en forma de una corriente eléctrica de corta duración.

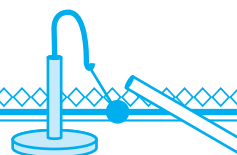
Obtengamos la expresión de la energía acumulada en el campo para un condensador de láminas paralelas.

Ya sabes que el campo entre tales láminas es homogéneo (Fig. 1.23c). Si su magnitud es E , entonces la magnitud del campo debido a cada lámina es $E/2$. Si ahora pensamos al condensador como una lámina con carga q colocada en el campo homogéneo de magnitud $E/2$ de la otra lámina (Fig. 1.36), podemos hallar fácilmente la expresión de la energía.

¿Por qué si la magnitud del campo entre las láminas del condensador de la figura 1.37 es E , entonces la debida a cada placa es $E/2$?



En el apartado 1.2.6 vimos que cuando se tiene una partícula con carga q en el campo eléctrico homogéneo entre dos láminas, la energía potencial es $E_p = qEx$, donde x es la posición de la partícula respecto a la lámina negativa. La lámina positiva del condensador representa un conjunto de partículas con cargas positivas, situadas en el campo de magnitud $E/2$ de la lámina negativa, a la distancia d de ella. Por tanto, según la ecuación anterior, la energía potencial del sistema de las dos láminas es:



$$E_p = qEx = q\left(\frac{E}{2}\right)d = \frac{1}{2}qEd = \frac{1}{2}q\Delta V$$

Recordando que $q = C\Delta V$, podemos escribir la **energía del condensador** como:

$$E_p = \frac{1}{2}C\Delta V^2$$

Cabe señalar que aunque hemos deducido esa expresión para un condensador de láminas paralelas, ella es válida para cualquier tipo de condensador.

Como hemos dicho, la energía del condensador se supone almacenada en el campo entre sus láminas. Por eso, si dividimos la expresión anterior entre el volumen delimitado por sus láminas, tendremos la **energía por unidad de volumen del campo**, o **densidad de energía** e_p . Para un condensador de láminas paralelas el cálculo es simple, ya que el volumen entre las láminas es Ad :

$$e_p = \frac{E_p}{Ad} = \frac{\frac{1}{2}C\Delta V^2}{Ad}$$

Teniendo en cuenta que $C = \frac{\epsilon A}{4\pi kd}$ y que $\Delta V = Ed$, queda:

$$e_p = \frac{\frac{1}{2} \frac{\epsilon A}{4\pi kd} (Ed)^2}{Ad} = \frac{1}{2} \frac{\epsilon E^2}{4\pi k}$$

$$e_p = \frac{\epsilon}{8\pi k} E^2$$

Si bien el resultado ha sido obtenido para un condensador de láminas, en el cual el campo eléctrico es homogéneo, él es válido en general, para cualquier campo electrostático, e incluso también para campos eléctricos que varían con el tiempo. Si en cierto instante en un punto del espacio la intensidad de campo eléctrico es E , podemos decir que en ese instante y en ese punto hay una energía potencial por unidad de volumen dada por la ecuación anterior.

Ejemplo 1.13. Un desfibrilador posee un condensador de $80 \mu\text{F}$ con un voltaje de $4.0 \times 10^3 \text{ V}$. a) ¿Qué carga tiene el condensador? b) ¿Cuánta energía eléctrica almacena? c) Si durante una descarga sobre el pecho de un paciente el desfibrilador transmite $2 \times 10^2 \text{ J}$ en 2 ms , ¿cuál es la potencia de la descarga?



a) De la ecuación $C = \frac{q}{\Delta V}$ se obtiene:

$$q = C\Delta V = (80 \times 10^{-6} \text{ F})(4.0 \times 10^3 \text{ V}) = 0.32 \text{ C}$$

Nota que esta carga es considerable. Como dijimos en otro lugar, la carga que adquieren los cuerpos en las experiencias ordinarias de electrización suele ser inferior a $1 \times 10^{-6} \text{ C}$. La carga del condensador del desfibrilador es varios millones de veces mayor.

$$\text{b) } E_p = \frac{1}{2}C\Delta V^2 = \frac{1}{2}(80 \times 10^{-6} \text{ F})(4.0 \times 10^3 \text{ V})^2 = 6.4 \times 10^2 \text{ J}$$

Esta energía aproximadamente equivale, por ejemplo, a la necesaria para elevar un cuerpo de 1 kg a 64 m de altura. Durante cada descarga del desfibrilador, se trasmite solo parte de esa energía.

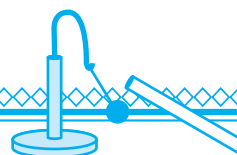
c) Potencia es la rapidez con que se transforma o transmite energía. En este caso:

$$P = \frac{\Delta E_p}{\Delta t}$$

donde ΔE_p es la energía transmitida durante la descarga y Δt su duración. Por tanto:

$$P = \frac{2 \times 10^2 \text{ J}}{2 \times 10^{-3} \text{ s}} = 1 \times 10^5 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 1 \times 10^5 \text{ W}$$

Esta potencia es realmente grande, unas $5\,000$ veces mayor que la de una lámpara de 20 W . Pero la descarga dura un tiempo muy breve.

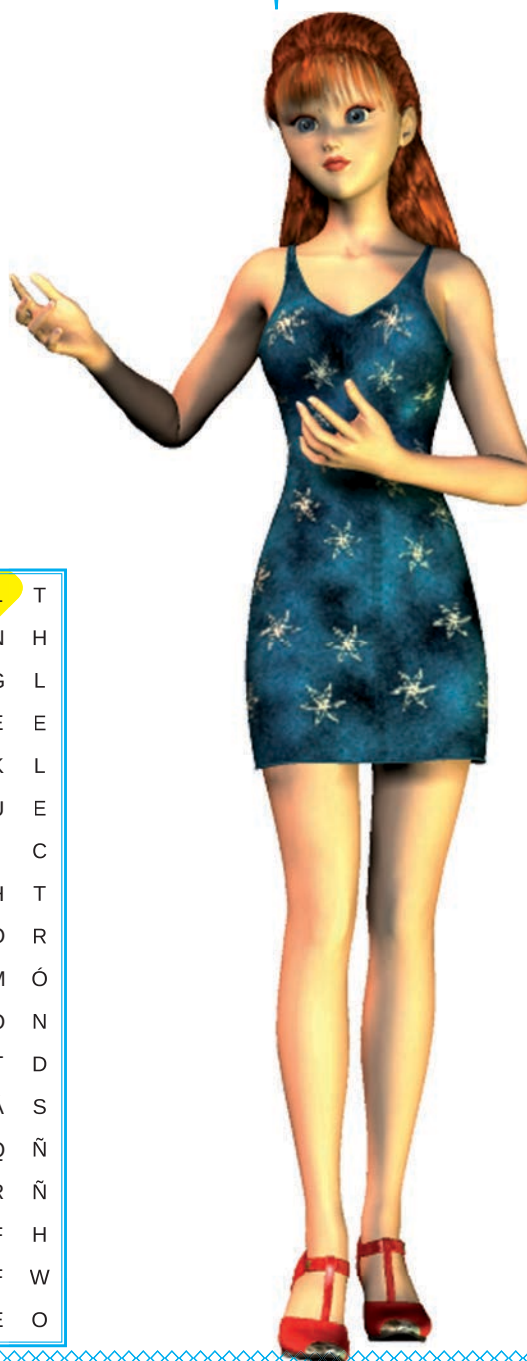


1.3. Actividades de sistematización y consolidación.

1.3.1. Sopa de letras.

Escribe cada palabra en Wik pedia o en Encarta y da un vistazo a lo que encuentres.

Átomo	Electromagnetismo
Campo	Electrón
Capacidad	Electroscopio
Carga	Faraday
Circuito	Faradio
Condensador	Homogéneo
Conductor	Molécula
Coulomb	Potencial
Dieléctrico	Protón
Electricidad	Voltio

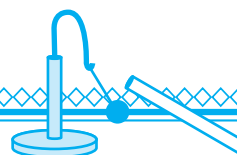




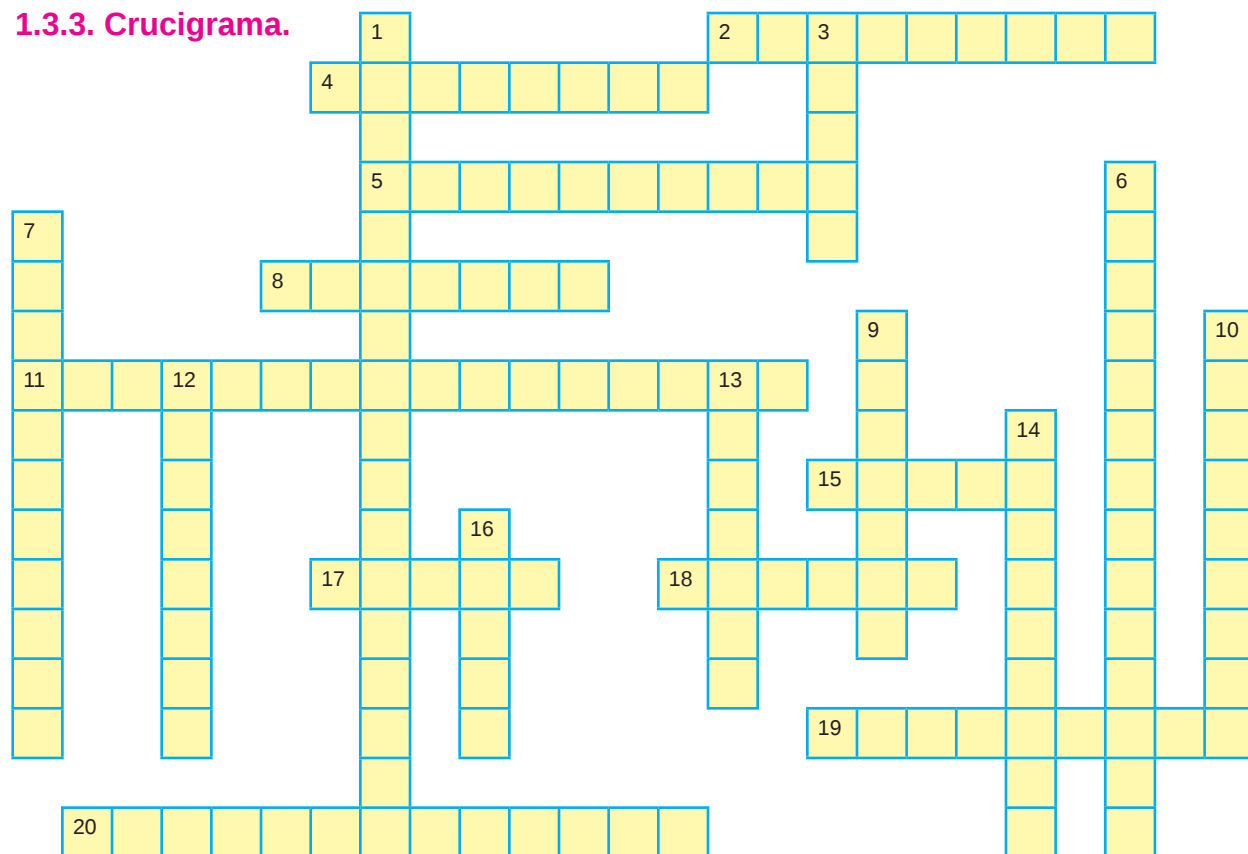
1.3.2. Conexión de conceptos e ideas.

Relaciona las dos columnas escribiendo el número según corresponda.

- | | |
|--|--|
| 1. Mantiene la integridad de los átomos, de las moléculas y de todos los cuerpos con los que nos relacionamos. | () Balanza de torsión |
| 2. Científico cuyo nombre reciben las ecuaciones fundamentales del electromagnetismo. | () Campo eléctrico |
| 3. Conjunto de componentes eléctricos conectados entre sí formando una trayectoria cerrada. | () Capacidad eléctrica |
| 4. Científico a quien se debe la idea de líneas de campo. | () Carga eléctrica elemental |
| 5. Científico que se considera el descubridor del electrón. | () Charles A. Coulomb |
| 6. Científico a quien se debe la ley de la fuerza entre dos partículas cargadas en reposo. | () Circuito eléctrico |
| 7. Partículas responsables de que haya dos tipos de electricidad. | () Condensador |
| 8. Nombre que recibe la cantidad mínima de carga eléctrica. | () Constante dieléctrica |
| 9. Instrumento utilizado por Coulomb para establecer la ley que lleva su nombre. | () Densidad de energía |
| 10. Ente que rodea a todo cuerpo cargado eléctricamente y que actúa sobre otros cuerpos con carga. | () Dieléctricos |
| 11. Nombre de la magnitud utilizada para caracterizar el campo eléctrico. | () Dieléctricos no polares |
| 12. Líneas en el espacio que rodea a un cuerpo cargado, empleadas para caracterizar su campo eléctrico. | () Dieléctricos polares |
| 13. Energía de un sistema de cuerpos electrizados debida a la interacción eléctrica entre ellos. | () Diferencia de potencial |
| 14. Variación de la energía potencial por unidad de carga que tiene lugar cuando una partícula cargada se desplaza entre dos puntos de un campo eléctrico. | () Electrones y protones |
| 15. Nombre que comúnmente reciben en Física los aisladores. | () Energía potencial eléctrica |
| 16. Materiales en que los centros de carga positiva y negativa de sus moléculas no coinciden. | () Intensidad de campo eléctrico |
| 17. Materiales en que los centros de carga positiva y negativa de sus átomos o moléculas coinciden. | () Interacción electromagnética |
| 18. Cociente entre la magnitud del campo en el que se coloca un material y la magnitud del campo que resulta en su interior. | () James C. Maxwell |
| 19. Dispositivo que puede ser empleado para acumular carga eléctrica y energía. | () Joseph J. Thomson |
| 20. Magnitud que indica la carga eléctrica por voltio que puede almacenar un condensador. | () Líneas de campo eléctrico |
| 21. Energía por unidad de volumen del campo eléctrico. | () Michael Faraday |



1.3.3. Crucigrama.



Horizontales

2. Magnitud que es igual al cociente entre la carga y el voltaje de un condensador.
4. Nombre que tenía en la antigua Grecia cierta resina fósil que se electrizaba al ser frotada.
5. Se dice de la carga eléctrica debido a que siempre se transfiere en porciones que son múltiplos enteros de la carga elemental.
8. Apellido de uno de los científicos que más contribuyó al desarrollo del electromagnetismo.
11. Una de las cuatro interacciones fundamentales considerada por la Física.
15. Ente que rodea a todo cuerpo cargado eléctricamente y que actúa sobre otros cuerpos con carga.
17. Tipo de material en el cual los electrones más externos de los átomos pierden el enlace con átomos dados y se mueven libremente dentro de la red de iones.
18. Unidad de diferencia de potencial.
19. Energía potencial por unidad de carga en un punto dado del campo eléctrico.
20. Nombre del instrumento que sirve para detectar si un cuerpo está cargado.

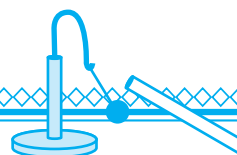
Verticales

1. Parte de la Física que examina los fenómenos eléctricos y magnéticos y la vinculación entre ellos.
3. Tipo de dieléctrico en que los centros de carga positiva y negativa de sus moléculas no coinciden.
6. Parte del electromagnetismo que estudia la interacción electromagnética entre cuerpos o partículas cargados sin considerar el movimiento de éstos.
7. Nombre de un dispositivo básico empleado en los circuitos eléctricos.
9. Unidad de Capacidad eléctrica.
10. Se dice de la mínima cantidad de carga eléctrica que existe.
12. Sistema de dispositivos eléctricos conectados entre sí formando una trayectoria cerrada.
13. Unidad de carga eléctrica.
14. Se dice del campo eléctrico cuya magnitud, dirección y sentido son los mismos en todos los puntos del espacio.
16. Magnitud que caracteriza el grado de electrificación de los cuerpos.

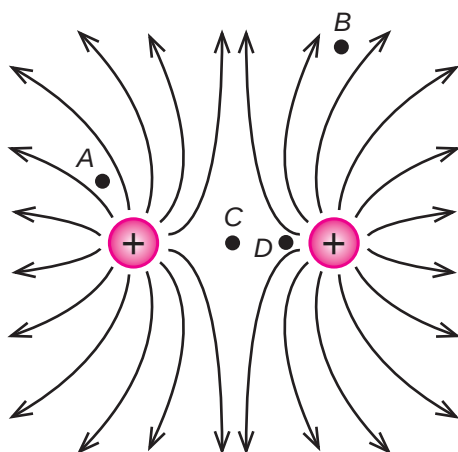


1.3.4. Actividades de repaso.

1. Comenzando con el término “Electromagnetismo”, confecciona un diagrama que conecte y ramifique conceptos e ideas como los siguientes: interacción electromagnética, Electrostática, carga eléctrica, ley de Coulomb, campo eléctrico, potencial y diferencia de potencial, condensador, energía del campo eléctrico.
2. Intenta responder, resumidamente, las siguientes preguntas: ¿qué es la electricidad?, ¿cuáles son algunas de sus aplicaciones de interés?, ¿en qué consisten la ley de conservación de la carga eléctrica y la ley de Coulomb?, ¿cómo acumular gran cantidad de carga eléctrica en los conductores?
3. Expón e ilustra mediante ejemplos los conceptos de: a) carga eléctrica b) carga eléctrica elemental, c) campo eléctrico, d) intensidad de campo eléctrico e) líneas de campo, f) campo eléctrico homogéneo, g) potencial y diferencia de potencial, h) dieléctricos polar y no polar, i) condensador, j) capacidad eléctrica.
4. Explica cómo se utilizan las ideas básicas de la Electrostática en el funcionamiento de: a) la fotocopidora, b) la impresora de “chorro de tinta”, c) un desfibrilador portátil.
5. Si los átomos están compuestos por partículas con carga, ¿qué significa entonces la frase “un átomo neutro”?
6. Como sabes, los núcleos atómicos están formados por protones y neutrones concentrados en un volumen extremadamente pequeño. ¿Cómo se explica que mantengan su integridad, pese a las enormes fuerzas de repulsión entre los protones?
7. Explica por qué un cuerpo electrizado pierde con el tiempo dicha propiedad.
8. Explica, desde el punto de vista microscópico, la electrización de una regla plástica al frotarla con un paño o un pedazo de papel.
9. ¿Se electrizarán dos pedazos de papel recortados de una misma hoja al frotarlos entre sí? ¿Y dos láminas de un mismo plástico? Explica.
10. Atendiendo a la estructura interna de los cuerpos, ¿cómo se explica la atracción que ejerce uno electrizado sobre a) un cuerpo metálico, b) un cuerpo plástico o un pedacito de papel?
11. Describe los diversos procedimientos que conozcas de electrización de los cuerpos.



12. Una regla plástica se electrizó quedando cargada negativamente. ¿Permanece invariable la masa de la regla?
13. Se tienen dos cuerpos metálicos sobre soportes aislantes, una regla plástica y un paño. ¿Cómo electrizar los cuerpos con cargas de igual magnitud y signos opuestos, sin tocarlos?
14. Una regla plástica cargada negativamente atrae a un cuerpo suspendido mediante un hilo aislante. ¿Puede afirmarse que el cuerpo que cuelga del hilo está cargado positivamente? Y si una varilla de vidrio cargada positivamente hubiese repelido al cuerpo, ¿podría afirmarse que está cargado positivamente?
15. Imagina que alguien afirma que los cuerpos son atraídos hacia la Tierra por una fuerza eléctrica y no gravitatoria. ¿Cómo pudieras probar que no es cierto?
16. ¿Puede una partícula tener una carga eléctrica 2.3 veces mayor que la carga del electrón? Argumenta.
17. Observa la siguiente figura y ordena de menor a mayor la intensidad del campo en los puntos A, B, C y D.



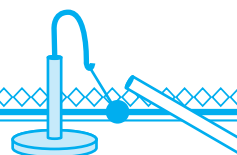
18. Como sabes, un cuerpo electrizado atrae pequeños pedacitos de papel. ¿Qué sucederá con un pedacito de papel colocado en el campo eléctrico homogéneo entre dos láminas con cargas de signo contrario? Explica.
19. Imagina que de la placa negativa del sistema de la figura 1.25 se desprende un electrón, el cual se mueve hacia la placa positiva. ¿Aumenta o disminuye la energía potencial del sistema? ¿El electrón se mueve hacia un punto de mayor o menor potencial?



20. En un soporte aislante se fija una esfera metálica hueca, a cuya superficie exterior se conecta un electrómetro que permite determinar la magnitud y el signo de la carga que tenga la esfera. Por un orificio de ésta se introduce un cuerpo metálico cargado negativamente, colgado de un hilo aislante. a) ¿Qué tipo de carga indicará el electrómetro si el cuerpo introducido no toca la esfera? b) ¿Qué indicará luego de tocar el interior de la esfera? c) ¿Y si se extrae el cuerpo y luego de desconectar el electrómetro de la esfera se conecta a él?
21. Durante una tormenta acompañada de relámpagos es más seguro estar dentro de un carro que fuera. ¿Por qué?



22. Traza el gráfico aproximado del módulo de la intensidad de campo eléctrico de una esfera conductora cargada en función de la distancia al centro de la esfera.
23. ¿Tendrían igual magnitud las cargas de las láminas del condensador de la figura 1.32 si sus láminas no fuesen del mismo tamaño?
24. Una placa de cobre se coloca entre las láminas del condensador de la figura 1.32, sin hacer contacto con las láminas. ¿Cómo afecta esto a la capacidad?
25. El condensador de la figura 1.32 se carga con ayuda de la batería y luego se desconecta de ella. Entre sus láminas se introduce un bloque de dieléctrico. Analiza qué sucede con: a) su carga eléctrica, b) la intensidad del campo eléctrico en su interior, c) la diferencia de potencial entre sus láminas, d) su capacidad eléctrica, e) la energía que almacena. ¿Cuál sería la respuesta a los incisos anteriores si el condensador se mantiene conectado a la batería mientras se introduce el dieléctrico entre sus láminas?



1.3.5. Ejercicios de repaso.

1. Los centros de dos pequeñas esferas metálicas con carga de $7.4 \times 10^{-8} \text{ C}$ están a 10 cm uno de otro. a) ¿Cuál es la fuerza eléctrica entre ellas? b) Una de las esferas se toca con otra idéntica neutra, ¿cuál es ahora la fuerza eléctrica si se mantienen a la misma distancia? La constante en la expresión de la ley de Coulomb es $k = 9.0 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2$.

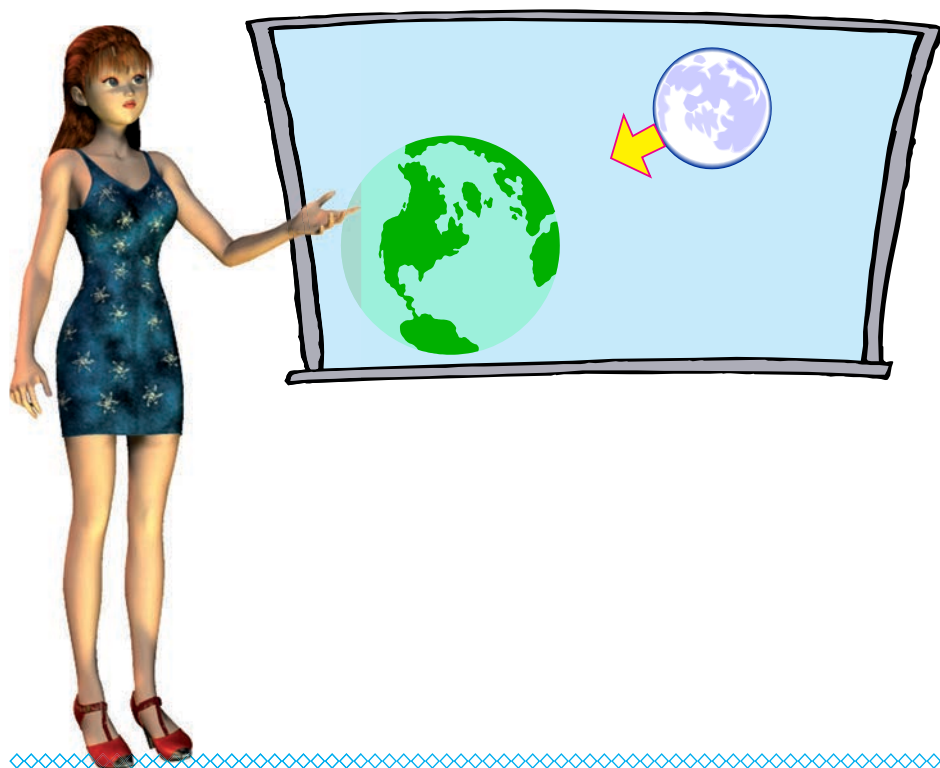
Respuesta: a) 0.0049 N, b) 0.0025 N

2. En el átomo de hidrógeno, calcula cuántas veces mayor que la fuerza gravitatoria es la fuerza eléctrica entre el electrón y el núcleo. La carga elemental es $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, la masa del electrón $m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ y la del protón $m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$, la constante de gravitación, $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ y la constante en la expresión de la ley de Colulomb, $k = 9.0 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2$.

Respuesta: 2.3×10^{39} veces

3. La fuerza de atracción que mantiene a la Luna en órbita alrededor de la Tierra es $2.0 \times 10^{26} \text{ N}$. a) ¿Qué carga de igual magnitud y signos opuestos deberían tener la Tierra y la Luna para igualar dicha fuerza? b) ¿Qué cantidad de electrones en exceso o defecto corresponde a dicha carga? Considera la Tierra y la Luna como partículas y la distancia entre ellas $3.8 \times 10^5 \text{ m}$, la carga del electrón es $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$. La constante en la expresión de la ley de Colulomb, $k = 9.0 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2$.

Respuesta: a) $5.7 \times 10^{13} \text{ C}$, b) 3.5×10^{32} electrones





4. Se sabe que cada átomo de cobre aporta dos electrones libres. a) Considera una esfera de cobre de 1 cm^3 de volumen y utiliza los datos y resultados del Ejemplo 1.3 para determinar el número de electrones libres de la esfera. b) Imagina que todos sus electrones libres se transfieren a otra esfera y que las dos esferas se colocan a 1.0 m una de otra, ¿cuál sería la fuerza de atracción entre ellas?

Respuesta: a) 8.4×10^{22} electrones, b) $1.6 \times 10^{-18} \text{ N}$

5. a) Si de la esfera de cobre del problema anterior solo se separara y concentrara en otra esfera el 1% de sus electrones libres, ¿cuál sería la fuerza de atracción entre ellas al colocarlas a 1.0 m una de otra? b) Este problema ilustra que por qué solo es posible separar una parte insignificante de los electrones y protones que posee un cuerpo. Explica.

Respuesta: $1.6 \times 10^{-14} \text{ N}$

6. Entre dos láminas horizontales hay un campo homogéneo de intensidad $1.3 \times 10^5 \text{ V/m}$, dirigido verticalmente hacia abajo. Una microscópica gota líquida de masa $2.0 \times 10^{-9} \text{ g}$ está en equilibrio en dicho campo. Encuentra: a) la carga de la gota, b) el número de electrones que tiene en exceso o defecto.

Respuesta: a) $1.5 \times 10^{-16} \text{ C}$, b) 942 electrones en exceso

7. Para la situación del ejemplo 1.5, determina la magnitud de la intensidad de campo resultante en: a) el punto medio entre las esferas, b) un punto P situado 5.0 cm encima del punto medio.

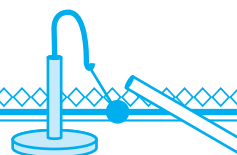
Respuesta: a) 0, b) $1.9 \times 10^5 \text{ V/m}$ en la línea que une el punto medio y el P

8. Imagina que las esferas que cuelgan de los hilos en la situación del ejemplo 1.5 se fijan en las posiciones representadas en la figura. Utiliza los resultados del problema anterior para hallar la fuerza ejercida sobre una tercera esfera con igual carga que se colocara en, a) el punto medio entre las esferas, b) un punto situado 5.0 cm encima del punto medio. c) ¿Por qué en este problema se habrá dicho que se fijan las esferas que cuelgan de los hilos?

Respuesta: a) 0, b) $1.4 \times 10^{-2} \text{ N}$ dirigida verticalmente hacia arriba

9. La Tierra está rodeada de un campo eléctrico dirigido hacia su interior, cuya intensidad es, como promedio, 150 V/m . a) Considera que en cierta región el campo tiene ese valor y determina la diferencia de potencial entre los pies y la cabeza de una persona de 1.70 m. b) ¿Cuándo será mayor la energía potencial debida a ese campo, al situar un globo con carga positiva en la cabeza o en el suelo? c) ¿Y si el globo estuviese cargado negativamente? Argumenta.

Respuesta: a) 255 V, b) en la cabeza, c) en el suelo



10. En la situación del ejemplo 1.8: a) ¿qué variación de energía potencial tiene lugar cuando la gota recorre las placas?, b) ¿cuál es la diferencia de potencial entre los puntos de entrada y salida de la gota?

Respuesta: a) $-1.6 \times 10^{-10} \text{ J}$, b) $1.3 \times 10^3 \text{ V}$

11. Un condensador de capacidad $20 \mu\text{F}$ se carga conectándolo a una batería de 12 V . ¿Qué cantidad de carga pasó a través de la batería?

Respuesta: $2.4 \times 10^{-4} \text{ C}$

12. Se puede construir un condensador “casero” colocando una hoja de papel entre dos de papel de aluminio. Imagina que la hoja de papel tiene $21 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ y un espesor de 0.10 mm . a) ¿Cuál sería la capacidad del condensador? b) ¿Qué carga almacena si se conecta a una batería de 12 V c) ¿Qué voltaje máximo podría soportar?

Respuesta: a) $1.9 \times 10^{-8} \text{ F}$ ó $0.019 \mu\text{F}$, b) $2.3 \times 10^{-7} \text{ C}$, c) $1.6 \times 10^3 \text{ V}$ ó 1.6 kV

13. Entre los tipos de micrófono profesionales más utilizados en la actualidad están los de condensador. Su elemento básico consiste en dos láminas conductoras cuya separación varía ligeramente al incidir sobre una de ellas la onda sonora. Un circuito electrónico convierte las variaciones de capacidad en señales eléctricas que son enviadas al reproductor de sonido. Imagina un micrófono de este tipo con área de sus láminas conductoras de 3.0 cm^2 cada una, separadas una distancia de 1.0 mm . a) ¿Cuál es su capacidad? b) Si las láminas se acercan 0.10 mm , ¿cuál es la nueva capacidad?

Respuesta: a) $2.7 \times 10^{-12} \text{ F}$ ó 2.7 pF , b) 2.9 pF

14. Determina la energía eléctrica almacenada en un volumen de 10 m^3 cerca de la superficie de la Tierra, debida al campo eléctrico que la rodea. Considera que la intensidad del campo es 150 V/m .

Respuesta: $1.0 \times 10^{-7} \text{ J/m}^3$

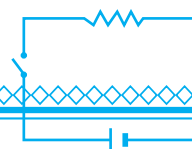
15. Un enorme condensador natural es el formado por una nube cargada y la superficie de la Tierra. Un modelo muy simplificado para poder efectuar algunas estimaciones, consiste en suponer que la parte baja de la nube y la superficie de la Tierra representan un condensador plano en que el campo es homogéneo. Valores posibles son: el área de la parte baja de la nube, $1 \times 10^2 \text{ km}^2$; su distancia a la superficie de la Tierra 1.5 km y la diferencia de potencial entre ellas $3 \times 10^7 \text{ V}$. Determina para este “condensador”: a) su capacidad eléctrica, b) la carga que acumula, c) la intensidad de campo, d) la energía potencial y la densidad de energía eléctrica.

Respuesta: a) $0.6 \mu\text{F}$, b) $2 \times 10 \text{ C}$, c) $2 \times 10^4 \text{ V/m}$, d) $3 \times 10^8 \text{ J}$, $2 \times 10^{-3} \text{ J/m}^3$

2

Corriente eléctrica y circuitos





Durante el estudio del capítulo anterior te relacionaste con numerosos ejemplos de cuerpos que transfieren carga eléctrica a otro cuerpo: al tocar un cuerpo metálico con una regla plástica cargada, o sencillamente acercarla hasta saltar una chispa; el rayo, que es una variante de lo anterior a gran escala; la descarga de un condensador a través de un bombillo, o a través del cuerpo humano, como en un desfibrilador. En todos estos casos la transferencia de partículas cargadas de un cuerpo a otro tiene lugar en tiempos muy breves. En este capítulo comenzaremos analizando las condiciones que se requieren para que tal movimiento de partículas cargadas pueda mantenerse, es decir, para que exista una **corriente eléctrica**. Luego profundizaremos en los efectos que ésta produce, introduciremos las magnitudes básicas con que se relaciona y examinaremos cuáles son sus peculiaridades en metales, líquidos, gases y semiconductores. Por último, estudiaremos el funcionamiento de algunos circuitos y dispositivos eléctricos simples, pero de gran interés. En resumen, las cuestiones básicas que abordaremos serán:

¿En qué consiste la corriente eléctrica? ¿Cuáles son las condiciones que se requieren para que exista? ¿Qué efectos puede producir? ¿Cuáles son las magnitudes básicas que la caracterizan y cómo operar con ellas? ¿Qué peculiaridades tiene en los metales, líquidos, gases y semiconductores? ¿Cómo funcionan algunos circuitos y dispositivos eléctricos?

2.1. Corriente eléctrica.

2.1.1. Naturaleza de la corriente eléctrica y condiciones para que exista.

En la vida cotidiana frecuentemente escuchamos y empleamos el término “corriente eléctrica”. La palabra **corriente** generalmente se relaciona con flujo o movimiento de algo en cierta dirección: corriente de agua, de aire, corriente sanguínea. Consecuentemente, corriente eléctrica significa flujo o movimiento **de electricidad** en determinada dirección. En los sólidos, como sabes, dicha electricidad se transmite generalmente por medio de electrones. Pero en los gases pueden desplazarse no solo electrones, sino además iones positivos



y negativos (como en las descargas eléctricas atmosféricas y en las lámparas fluorescentes). Por su parte, en los líquidos conductores de la electricidad, lo que fluye son iones (por ejemplo, durante una electrólisis).

De acuerdo con lo dicho en el texto, la transferencia de partículas de un cuerpo a otro durante la electrización por frotamiento y las descargas eléctricas atmosféricas son corrientes eléctricas.

¿Y también es una corriente eléctrica el haz de electrones en el tubo de pantalla de un televisor tradicional?

Se denomina *corriente eléctrica* al movimiento de partículas con carga eléctrica (electrones, iones u otras partículas) en determinada dirección.

En efecto, solo que ellas tienen lugar durante tiempos muy breves. Precisamente trataremos acerca de las condiciones que se necesitan para que se mantenga dicha corriente.

Sí, también, pues es un movimiento de partículas cargadas en determinada dirección.



Una corriente eléctrica es un movimiento de partículas cargadas, pero no todo movimiento de éstas representa una corriente eléctrica. Explica por qué.



¿Y el haz de electrones en el tubo de pantalla de un televisor tradicional?

Es necesario subrayar que tanto los electrones libres en los sólidos, como los iones en gases y líquidos, se mueven desordenadamente a grandes velocidades (Fig. 2.1) y que esto tiene lugar, haya o no corriente eléctrica. Lo que llamamos corriente eléctrica es el movimiento que, pese a ese continuo desplazamiento desordenado, realizan de conjunto las partículas con carga en **determinada dirección**.

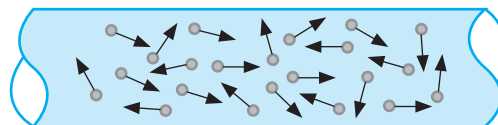
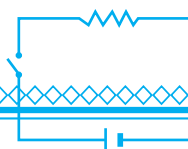


Fig. 2.1. Tanto los electrones libres en los sólidos como los iones en gases y líquidos se mueven desordenadamente a grandes velocidades.



Ahora que ya tienes una idea de qué es la corriente eléctrica, intentaremos contestar la segunda pregunta planteada al comienzo de la unidad: *¿Cuáles son las condiciones que se requieren para que exista?*

De acuerdo con lo dicho anteriormente, **para que exista una corriente eléctrica se requiere, en primer lugar, la presencia de partículas cargadas libres**. Esto es lo que hace a los cuerpos **conductores**. Si los electrones y protones están enlazados entre sí en los átomos o moléculas, como en los dieléctricos, entonces no puede tener lugar una corriente eléctrica.

En segundo lugar, se necesita una fuerza que actúe en determinada dirección sobre esas partículas con carga. Dicha fuerza, como sabes, puede ser originada por un **campo eléctrico**. Y si se tiene un campo eléctrico a lo largo del conductor, entonces también podemos decir que hay una **diferencia de potencial** entre sus extremos.

De modo que **la segunda condición para que exista una corriente eléctrica es que haya un campo eléctrico en el conductor, o lo que es equivalente, cierta diferencia de potencial entre dos puntos suyos**.

Probablemente te preguntarás, ¿campo eléctrico en un conductor?, ¿y no vimos en la unidad anterior que en ellos la intensidad de campo es nula? Sin embargo, debes tener en cuenta que la intensidad de campo en el interior del conductor es nula, cuando las partículas con cargas de signos contrarios, al moverse bajo la influencia del campo se acumulan en lados opuestos del conductor, originando una intensidad de campo que compensa a la del campo externo. Si las partículas tienen la posibilidad de moverse permanentemente en un circuito, entonces la intensidad del campo externo no es compensada. Cuando el campo externo se suprime, desaparece el movimiento orientado de las partículas cargadas y, por tanto, la corriente eléctrica. Esto se debe a la resistencia que presentan al movimiento, en el caso de los metales, la red de iones a través de la cual se desplazan los electrones y en el caso de los electrolitos y gases, las moléculas neutras.



Resume las condiciones esenciales que se requieren para generar y mantener una corriente eléctrica.



Resume las condiciones que se requieren para que exista corriente eléctrica.



Lo estudiado en la unidad anterior sugiere que un procedimiento elemental de crear un campo en el interior de un conductor, digamos en un alambre, y generar así una corriente eléctrica, podría consistir en conectar el alambre a dos cuerpos metálicos *A* y *B* (Fig. 2.2), uno de ellos, por ejemplo el *A*, con carga. **Bajo la acción del campo** originado por *A*, los electrones libres, no obstante su movimiento desordenado, se orientan en dirección al cuerpo *B*. Sin embargo, esta corriente eléctrica existe solo por un instante, para mantenerla se requiere **algún dispositivo que, continuamente, al tiempo que acumula electrones en una parte del conductor, extraiga de la otra**. Esta es la tercera condición que se necesita para mantener una corriente eléctrica.

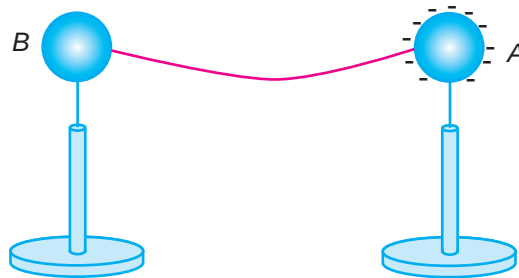


Fig. 2.2. Bajo la acción del campo eléctrico originado en el alambre por el cuerpo cargado, los electrones libres orientan su movimiento en dirección al cuerpo *B*.

Durante los siglos XVIII y XIX se idearon varios mecanismos basados en la electrización **por frotamiento** -denominados **máquinas electrostáticas**- que permitían mantener la situación esquematizada en la figura 2.2. En la figura 2.3 se muestran la máquina de Wimshurst, desarrollada a finales del siglo XIX y el generador de Van de Graaff, inventado alrededor de 1930. Pero la eficiencia de los generadores electrostáticos para producir corriente es extremadamente pequeña, logran transformar solo una pequeña parte de la energía mecánica invertida en el frotamiento, en energía eléctrica.

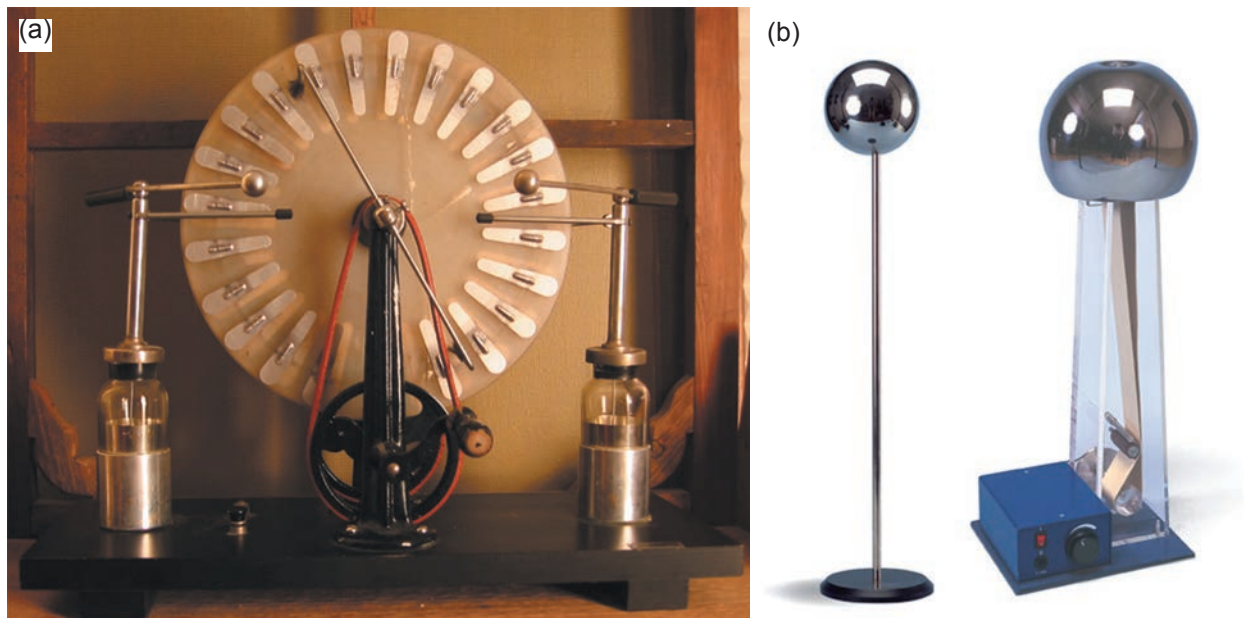


Fig. 2.3. (a) Máquina de Wimshurst, desarrollada a fines del siglo XIX. (b) Generador de Van de Graaff, inventado hacia 1930.

Como hemos dicho, el primer generador o fuente de electricidad efectivo fue la pila eléctrica, inventada por Alessandro Volta en el año 1800. Su fundamento es también **la electrización de un cuerpo al ponerlo en contacto con otro de diferente material**. Por ejemplo, cuando en agua acidulada con sulfúrico se introduce una lámina de zinc, esta se electriza negativamente. Si en la misma disolución se coloca una de cobre, apenas se electriza. Por eso, si a continuación el zinc y el cobre se unen mediante un conductor, se produce una corriente eléctrica (Fig. 2.4a). En las pilas electroquímicas, como la de Volta (Fig. 2.4b), tiene lugar una continua transformación de energía interna en energía de la corriente eléctrica. Si se desconecta el conductor que une los terminales, la reacción cesa. La pila de Volta fue precursora de las modernas pilas electroquímicas.

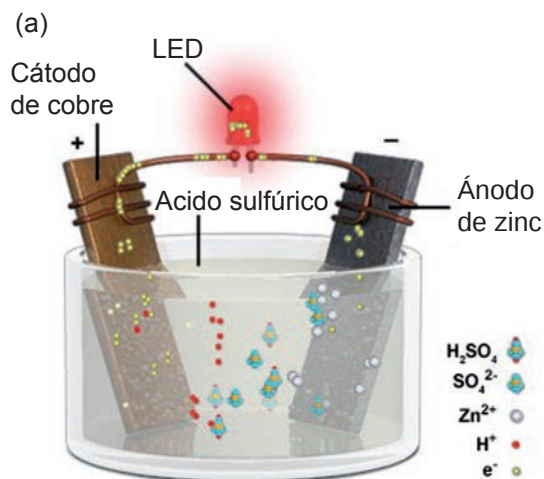


Fig. 2.4a. Cuando una lámina de zinc se introduce en una solución acidulada con sulfúrico se carga negativamente. Por eso, si mediante un conductor se unen las láminas circula corriente eléctrica y al intercalar un LED este se enciende.

¡Entonces el fundamento de la pila de Volta es, en esencia, el mismo que el de la electrización al poner un cuerpo en contacto con otro de un material diferente!

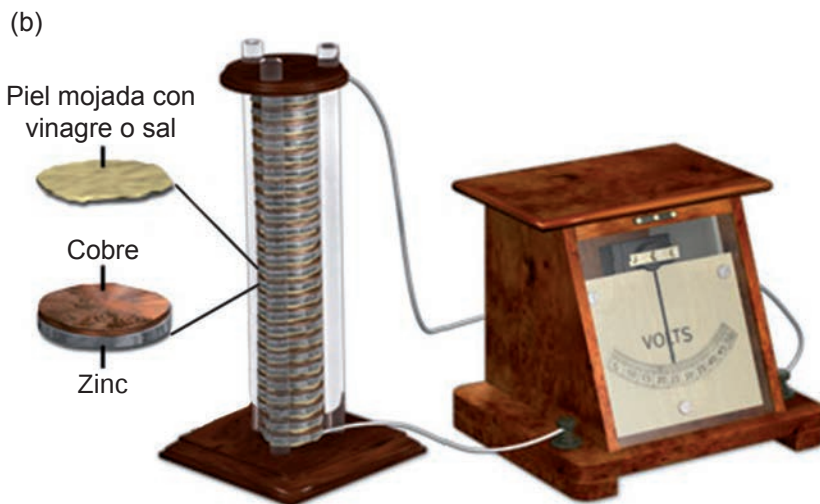


Fig. 2.4b. Pila electroquímica semejante a la inventada por Volta.



Indaga cuál es la razón por la cual los generadores electroquímicos de electricidad suelen denominarse “pilas”.

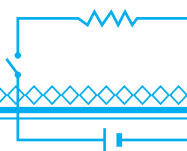
Indaga acerca de diversas aplicaciones de las celdas solares.



Sí, recuerda que la función del frotamiento es, básicamente, mejorar el contacto entre los cuerpos. Y el contacto de un líquido y un sólido puede ser excelente.

Además de las pilas electroquímicas, en la actualidad se ha extendido el uso de las **pilas o celdas solares**. Una explicación muy simplificada de su funcionamiento consiste en lo siguiente: Si se unen dos materiales **semiconductores** apropiados, en la zona de contacto uno se electriza negativamente y el otro positivamente. En consecuencia, al unir mediante un conductor sus extremos libres, fluiría una corriente eléctrica. La corriente se mantiene transmitiendo energía a la unión, al hacer incidir radiación sobre ella.

De este modo, en las pilas, la energía necesaria para mantener la corriente eléctrica se obtiene mediante reacciones químicas, elevación de temperatura, radiación, según sean electroquímicas, térmicas o solares. La región de la pila donde se acumula carga positiva se denomina terminal (o polo) positivo y la región donde se acumula carga negativa, terminal (o polo) negativo.



2.1.2. Efectos de la corriente eléctrica.

Desde el curso de Mecánica conoces que en la naturaleza no ocurre ningún cambio sin que tenga lugar algún otro cambio, y que esto constituye el aspecto cualitativo de una ley universal, la ley de conservación de la energía. En las pilas electroquímicas, térmicas o solares, la reacción química, la elevación de temperatura o la radiación, originan corriente eléctrica. A su vez, esta puede dar lugar a otros cambios, comúnmente denominados **efectos de la corriente eléctrica**. Entre los efectos más comunes se encuentran los **térmicos**, **luminosos**, **químicos** y **magnéticos** (Fig. 2.5). La corriente eléctrica puede originar también ondas electromagnéticas, por ejemplo, de radio y televisión. Es en estos cambios o efectos producidos por la corriente eléctrica que se apoya el funcionamiento de los equipos eléctricos.



Fig. 2.5. Ejemplos de efectos de la corriente eléctrica: (a) térmico, (b) luminoso, (c) químico, (d) magnético, (e) generación de ondas electromagnéticas.

Los efectos luminoso y térmico de las descargas eléctricas atmosféricas han acompañado al hombre a lo largo de toda su existencia, sin que durante mucho tiempo este supiera que eran producidos por una breve pero gigantesca corriente eléctrica. Luego de inventarse la pila eléctrica en 1800 los científicos inmediatamente comenzaron a investigar los efectos luminoso, térmico y químico de la corriente. El efecto magnético fue descubierto un poco más tarde, en 1820, por el físico y químico Hans Christian Oersted (1777-1851), al parecer casualmente, mientras

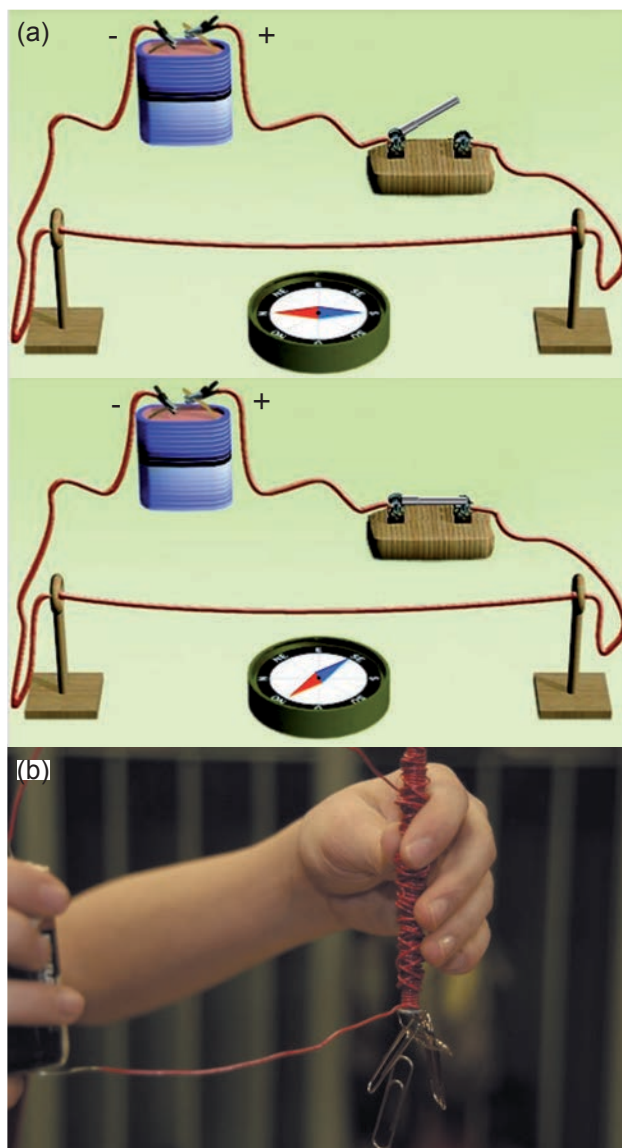
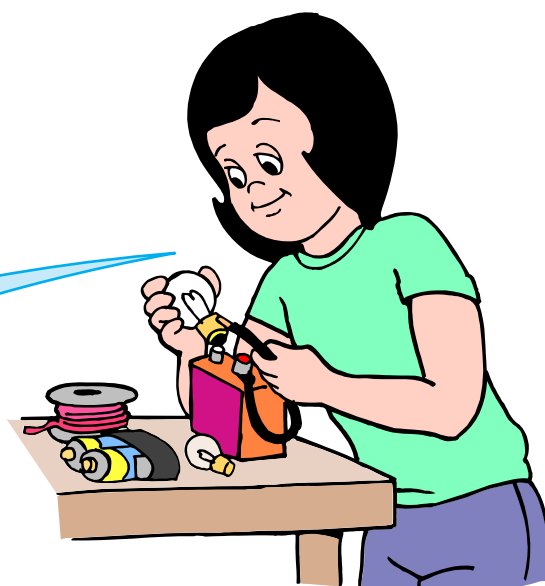


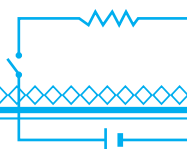
Fig. 2.6. Efecto magnético de un conductor con corriente: (a) la aguja de una brújula se desvía al colocar sobre ella un conductor con corriente (Experiencia de Oersted), (b) El efecto magnético se refuerza si el conductor se enrolla alrededor de un cuerpo ferroso (electroimán).

preparaba una conferencia. La experiencia, conocida como **experiencia de Oersted**, consiste en lo siguiente: si sobre una aguja magnética (brújula) orientada en el campo magnético de la Tierra se coloca, paralelamente a ella, un conductor con corriente eléctrica (Fig. 2.6a), entonces la aguja se desvía. El experimento pone de manifiesto que **la corriente provoca sobre la aguja un efecto similar al de un imán**. Si el conductor con corriente se enrolla alrededor de un cuerpo ferroso (electroimán), el efecto magnético se refuerza (Fig. 2.6b).

Entre los efectos de la corriente eléctrica pudiera decirse que el más fundamental es el magnético, porque a diferencia de los otros, se manifiesta en todos los casos, sin exclusión alguna, en que hay una corriente eléctrica. El efecto químico, por ejemplo, solo tiene lugar en electrolitos disueltos o fundidos, y el térmico no se manifiesta en los superconductores.

Menciona ejemplos de equipos electrodomésticos cuyo funcionamiento se apoye en cada uno de los efectos de la corriente eléctrica mencionados en el texto.





2.1.3. Sentido de la corriente, corrientes directa y alterna.

¿Qué sucede con el movimiento de las partículas cargadas en un circuito eléctrico, si se intercambian los terminales o polos de la pila eléctrica a que está conectado?

Cuando se intercambian entre sí los polos de una pila eléctrica a la que está conectado, por ejemplo un bombillo de linterna, se invierte el sentido de la intensidad de campo eléctrico y, por tanto, también el de las fuerzas que actúan sobre los electrones y el del movimiento de conjunto de éstos. No obstante, los efectos térmico y luminoso producidos por la corriente continúan siendo exactamente los mismos.

Sin embargo, en el experimento de Oersted (Fig. 2.6a), al intercambiar los polos de la batería a que está conectado el conductor, el efecto producido varía: la aguja magnética se desvía hacia el lado opuesto. Similarmente, al invertir la conexión en los terminales de un electroimán (Fig. 2.6b), aunque continúa atrayendo pedazos de metal ferroso, su polo norte pasa a ser sur y a la inversa, lo que puede comprobarse con ayuda de una brújula. El efecto químico también depende del **sentido de la corriente**. Por ejemplo, en la electrólisis de una disolución de cloruro de sodio en agua, después de invertir los polos de la fuente, donde se liberaba cloro, se liberará hidrógeno y viceversa.

De este modo, el **sentido de la corriente** no influye en el funcionamiento de ciertos equipos y dispositivos, como por ejemplo en el caso de un bombillo o una hornilla eléctrica, pero es decisivo en muchas otras situaciones de la vida práctica: durante la electrólisis, al cargar una batería o pila, al poner en funcionamiento un reloj eléctrico, etc.

En los metales la corriente eléctrica se debe al movimiento de electrones, es decir, partículas de carga negativa, pero en los electrolitos y en los gases está formada por el movimiento de iones de ambos signos. El movimiento de los dos tipos de partícula, positiva y negativa, representa una corriente eléctrica, *¿cuál tomar entonces como sentido*

Planifica y realiza algunos experimentos con el propósito de constatar que los efectos magnético y químico de la corriente eléctrica dependen de su sentido.



de la corriente, el movimiento de las partículas de carga negativa o el de las partículas de carga positiva? Resulta que con solo una excepción los efectos de una corriente formada por partículas de carga negativa moviéndose en cierto sentido, son exactamente los mismos que los de una corriente igual de partículas con carga positiva, moviéndose en sentido contrario.

Hace mucho, antes de conocer la naturaleza de la corriente eléctrica, los científicos acordaron que **el sentido de la corriente es del terminal (o polo) positivo de la fuente al negativo, lo que equivale a una corriente de carga positiva.**

Así, aunque en un circuito formado por una pila y un bombillo (Fig. 2.7), la corriente eléctrica se debe a los electrones y estos se mueven en el sentido del polo negativo al positivo de la pila, de acuerdo con la convención histórica el sentido de la corriente es el contrario: del terminal positivo al negativo.

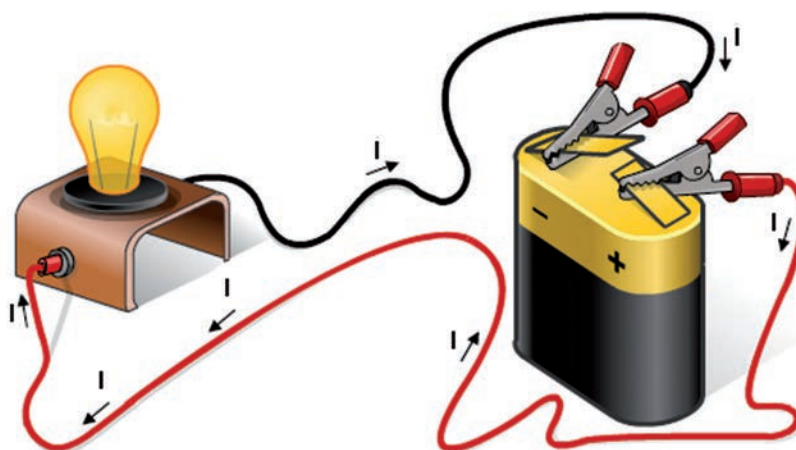
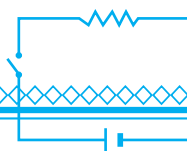


Fig. 2.7. De acuerdo con la convención adoptada, en este circuito la corriente fluye en el sentido del polo positivo de la fuente al negativo. Ello equivale a la corriente real negativa (electrones) que fluyen del polo negativo al positivo.

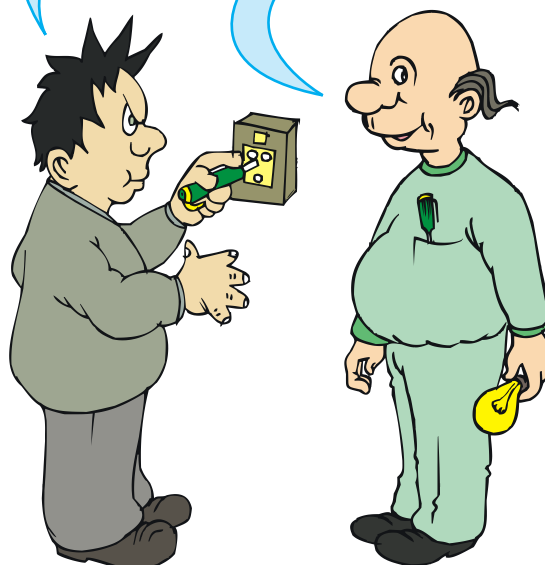


2.1.3.1. Corriente directa y corriente alterna.

La corriente producida por las pilas, acumuladores y otros generadores como los mencionados hasta aquí, se denomina **corriente directa (CD)**. Estos generadores **mantienen en sus terminales el mismo tipo de electricidad, positiva o negativa**, por lo que al conectarlos a un circuito **la corriente fluye siempre en un mismo sentido**. A diferencia de ellos, en un enchufe habitual de la red eléctrica, uno de los terminales (el comúnmente llamado “vivo”) -o los dos si es de 220 voltios- varía constantemente de positivo a negativo y viceversa con cierta rapidez. El voltaje en los terminales del enchufe y, en consecuencia, la corriente eléctrica en los conductores cuando algún equipo se conecta a él, realizan **oscilaciones, alternando** entre un sentido de movimiento y el contrario. De ahí que esta corriente se denomine **corriente alterna (CA)**. En México, la frecuencia o rapidez con que se realizan tales oscilaciones es de 60 Hz.

Explica con tus palabras en qué se diferencian la corriente “directa” y la corriente “alterna”.

¿Qué significa la afirmación del texto de que la corriente originada por un enchufe de la red eléctrica “oscila”?



Puesto que el sentido de la corriente no influye en los efectos térmico y luminoso, cuando se trata de ellos no importa si la corriente es directa o alterna. Sin embargo, en otras muchas aplicaciones y, en especial, para la transmisión de la energía eléctrica a grandes distancias resulta decisivo el uso de la corriente alterna. En esto profundizaremos en el capítulo 4.

Tal vez te estés haciendo algunas preguntas como las siguientes: ¿a qué velocidad avanzan los electrones cuando encendemos una linterna? o ¿qué distancia recorren en un conductor conectado a un enchufe si en este caso la corriente varía su sentido 60 veces por segundo?

Como ejemplo, consideremos un pequeño bombillo conectado a una pila mediante un alambre de cobre de alrededor de 15 cm de largo y 1 mm de diámetro (Fig. 2.8). Las partículas que constituyen los cuerpos, ya sean átomos y moléculas neutros, o iones y electrones “libres”, se mueven



Fig. 2.8. Los electrones del alambre que conecta el bombillo a la pila se mueven desordenadamente con velocidades del orden de los 1 000 km/s, pero la velocidad del movimiento de conjunto de tales electrones es inferior a 0.07 mm/s.

En la experiencia de la figura 2.8, ¿qué distancia habrán avanzado, de conjunto, los electrones que constituyen la corriente eléctrica al cabo de una hora?



desordenadamente y con grandes velocidades. En particular, semejante alambre tiene unos 10^{23} electrones “libres” que participan en la corriente eléctrica, los cuales se mueven caóticamente con una velocidad que, a la temperatura ambiente, es, por término medio, del orden de 1 000 km/s. Sin embargo, aún cuando la corriente en el alambre fuese de 1 **ampere**, lo cual es ya un valor relativamente alto para este caso, **la velocidad del movimiento de conjunto** de los electrones sería de tan solo unos 0,07 mm/s. ¡Imagina lo pequeña que será la amplitud de las oscilaciones que de conjunto realizan los electrones si la corriente es alterna! Probablemente te estés preguntando, ¿cómo es posible entonces que una lámpara se encienda inmediatamente que accionamos el interruptor?

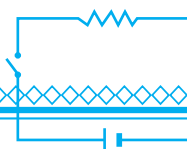
Recuerda que en los conductores metálicos como el alambre, la corriente eléctrica está formada por un movimiento de electrones en determinada dirección **al actuar sobre ellos un campo eléctrico**. Tal campo aparece inmediatamente que se cierra el interruptor y se propaga a través de él a una velocidad cercana a la de la luz, es decir, próxima a 300 000 km/s, por lo cual el efecto nos parece inmediato.

2.1.4. Magnitudes básicas en los circuitos eléctricos.

Cualquiera que sea el circuito de que se trate -desde el más simple hasta el más complejo- puede ser caracterizado mediante unas pocas magnitudes básicas: intensidad de corriente, diferencia de potencial o voltaje, potencia y fuerza electromotriz. A continuación examinamos cada una de estas magnitudes.

2.1.4.1. Intensidad de corriente.

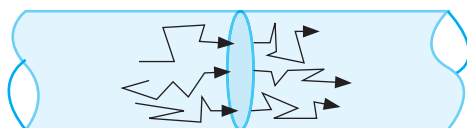
Ya sabes que la corriente eléctrica consiste en el movimiento de conjunto de partículas cargadas (electrones, iones u otras partículas cargadas) **en determinada dirección**. Pero naturalmente, la **carga neta** que en cierto tiempo pasa por la **sección transversal** de un conductor puede ser mayor o menor, dependiendo de la fuente de electricidad utilizada y de las características del circuito.



Se denomina **intensidad de corriente eléctrica (I)** a la rapidez con que fluye **carga neta** a través de la sección transversal de un conductor.

Si llamamos Δq a la **carga neta** que pasa por la sección transversal del conductor y Δt al intervalo de tiempo empleado en atravesarla, entonces la **intensidad de corriente** es:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

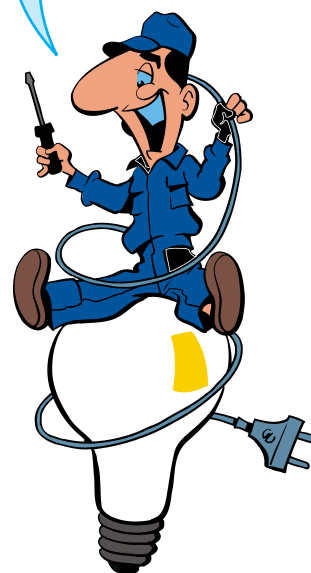


Por supuesto, si la rapidez con que fluye la carga no es constante, entonces la ecuación anterior expresa solo una **intensidad de corriente media**. En tales casos la intensidad de corriente instantánea es:

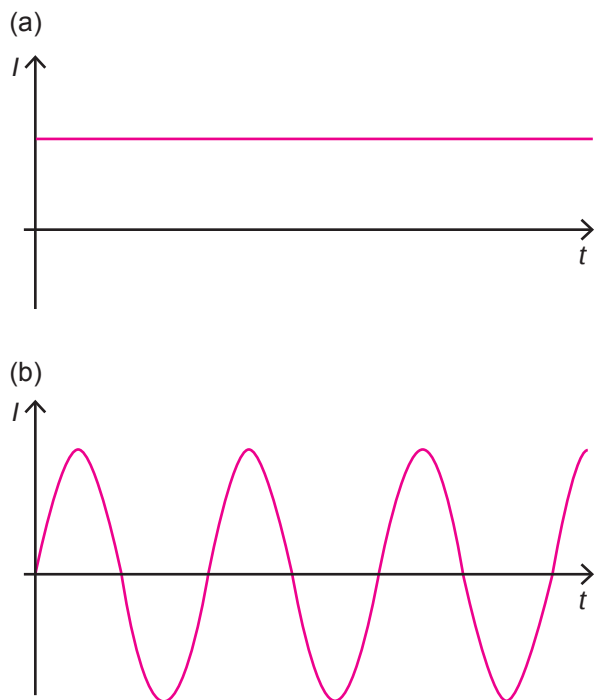
$$I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

Cómo realizar esta operación matemática, lo aprenderás en la formación profesional.

¿Por qué en el texto se subraya que la intensidad de corriente se refiere a la carga "neta" que pasa a través de la sección transversal de un conductor?



Imagina que para conectar un bombillo a unas pilas de linterna, utilizas un alambre de 1 mm de diámetro y otro de 2 mm. ¿En cuál de ellos será mayor la velocidad del movimiento orientado de los electrones? ¿Y la intensidad de corriente?



Al conectar un bombillo a varias pilas, como por ejemplo en una linterna, la corriente es **directa**, pues no varía su sentido, y además **constante**, porque su intensidad permanece la misma. Cuando se utiliza una batería para hacer pasar corriente eléctrica a través de un electrolito y realizar la electrólisis, la corriente también es directa y constante. En cambio, al conectar un bombillo de filamento a un enchufe habitual de la casa, la corriente es **alterna**. En este caso, además, la intensidad de corriente depende del tiempo según las funciones seno o coseno. En la figura 2.9 se muestran los gráficos de $I(t)$ para una **corriente directa constante** y para una **corriente alterna sinusoidal**.

Fig. 2.9. Gráficos de $I(t)$ para: (a) una corriente directa constante, (b) una corriente alterna sinusoidal.



André Marie Ampère (1775-1836), físico y matemático francés, quien introdujo el término “corriente eléctrica” y desarrolló aspectos importantes de la teoría electromagnética.

En el capítulo anterior ya dijimos que en el Sistema Internacional de Unidades, la unidad de intensidad de corriente eléctrica es el **ampere**, o **amperio**, (A). Recibió tal nombre en honor de André Marie Ampère, científico a quien se debe el término “corriente eléctrica”. Ésta es una unidad **fundamental**, de ella derivan las unidades de las demás magnitudes eléctricas, incluido, como allí vimos, el coulomb, que es la unidad de carga. En la siguiente unidad veremos cómo se establece el patrón del ampere, ahora nos limitaremos a recordar su relación con el coulomb ($1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$), con el cual ya estás familiarizado, y a dar los valores de intensidades de corriente en amperes en algunos casos de interés (Tabla 2.1). Esto te da una idea de lo que representa dicha unidad de corriente. En la práctica, además del amperio también se utilizan mucho algunos submúltiplos y múltiplos de él: miliampere (mA), microampere (μA) y kiloampere (kA).

Tabla 2.1. Algunos valores característicos de intensidad de corriente

Hecho o dispositivo de interés	Intensidad de corriente (I)
Valores más bajos que pueden ser detectados	1×10^{-17} A (63 electrones por segundo)
Impulso nervioso	10 μ A
Base de un transistor común	10-100 μ A
LED habitual	20-30 mA
Valor que al pasar por el cuerpo humano puede resultar letal	0.1 A
Bombillo de filamento de 60 W	0.5 A
Bombillo de linterna de 6 V	0.8 A
Motor común para elevar agua en una casa	5 A
Hornilla eléctrica	5-9 A
Límite permisible en un fusible común de vivienda	30 A
Descarga eléctrica atmosférica	20 kA

Los instrumentos utilizados para medir la intensidad de la corriente eléctrica se denominan **amperímetros** (Fig. 2.10a). La mayoría de las veces un mismo equipo denominado **multímetro** o **polímetro** (Fig. 2.10b), puede ser utilizado para medir intensidad de corriente, voltaje, potencia, capacidad eléctrica y resistencia eléctrica.

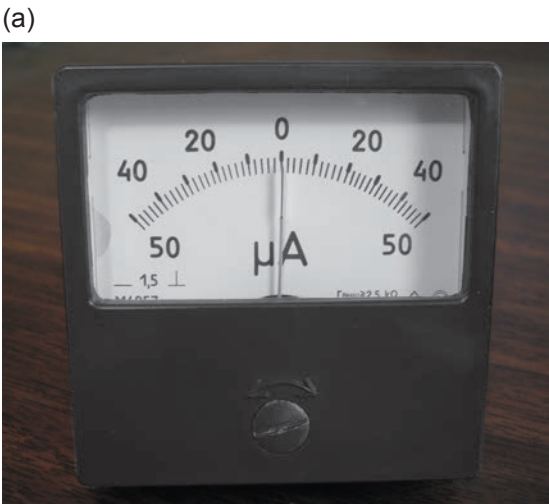


Fig. 2.10. (a) Microamperímetro analógico (de aguja). (b) Multímetro digital, utilizado para medir, entre otras magnitudes eléctricas, intensidad de corriente.



Ejemplo 2.1. Calcula qué cantidad neta de electrones entra al filamento de un bombillo de linterna (y sale de él) en un minuto, si la intensidad de corriente es de 0.80 A. ¿Por qué se especifica, “cantidad neta de electrones”?

La intensidad de corriente es:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

De aquí que la carga neta que en un minuto entra en el filamento es:

$$\Delta q = I \Delta t = (0.80 \text{ A})(60 \text{ s}) = 48 \text{ C}$$

Como los electrones tienen una carga $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, eso significa que el número neto que entra al filamento (y sale de él) en un minuto es:

$$\frac{\Delta q}{e} = \frac{48 \text{ C}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ C}} = 3 \times 10^{20} \text{ electrones}$$

Aún cuando no haya corriente eléctrica en el conductor, la cantidad de electrones y, por tanto de carga eléctrica, que cada segundo atraviesa una sección transversal suya es inmensa. Pero como el número de los que la atraviesa en un sentido es igual al de los que la atraviesa en sentido contrario, la **carga neta** que pasa a través de la sección transversal es nula. Una corriente eléctrica significa, que al movimiento desordenado de los electrones se añade un movimiento orientado, en determinada dirección y, en consecuencia, que el número de electrones que atraviesa la sección transversal en una dirección es mayor que en la opuesta dando por resultado una cantidad neta en determinada dirección.

2.1.4.2. Diferencia de potencial o voltaje.

Con la diferencia de potencial ya te relacionaste en la unidad anterior, ahora aplicaremos lo allí estudiado a los circuitos eléctricos.

Como conoces, las fuentes o generadores en un circuito producen un exceso de partículas de carga negativa en uno de sus terminales y de carga positiva en el otro. Esto origina un **campo eléctrico a través del circuito** y una **diferencia de potencial, o voltaje**, entre sus terminales. Consideremos el circuito de la figura 2.11. Aunque en este caso la corriente se debe a los electrones, ya sabes que la convención es asumir una **corriente de partículas de**

carga positiva en sentido opuesto. Dichas partículas se encontrarían en el campo eléctrico producido por la fuente en el interior del conductor y, por eso, de modo similar que en los casos estudiados en la unidad anterior (Fig. 1.25), tienen cierta energía potencial. Las más cercanas al polo positivo poseen mayor energía potencial y las más alejadas, menor. La energía potencial por unidad de carga en cada punto del campo eléctrico es el **potencial** en esos puntos. Según se recorre el circuito del polo positivo de la fuente al negativo, el potencial disminuye, por lo que suele decirse que hay una “caída de potencial”. Así, en la situación de la figura 2.11, la diferencia de potencial entre los puntos C y A, $V_A - V_C$, es mayor que entre los puntos B y A, $V_A - V_B$.

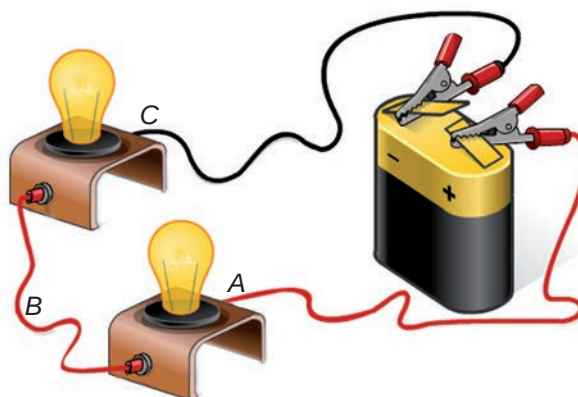


Fig. 2.11. En un circuito el potencial disminuye según se recorre del polo positivo al negativo de la fuente. La diferencia de potencial puede ser medida mediante un voltímetro.

Si los bombillos del circuito de la figura 2.11 son iguales, ¿qué diferencia de potencial debe haber entre los terminales de cada uno? Argumenta.

La diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito puede ser medida con un **voltímetro** (Fig. 2.10). Ya sabes que la unidad básica de medida del voltaje es el volt (V), pero también se emplean otras, como el milivolt (mV) y el kilovolt (kV). En la tabla 2.2 se relacionan algunos valores de voltaje de interés.



Tabla 2.2. Algunos valores característicos de voltaje.

Hecho o dispositivo de interés	Voltaje
Valor medio en un electrocardiograma	5 mV
Pila común de linterna	1.5 V
Batería de auto	12 V
Valor a partir del cual es peligrosa para el organismo humano	36 V (con la piel húmeda 12 V)
Red eléctrica de las viviendas	110 V/ 220 V
Producido por el pez anguila eléctrica	600 V
Generador de una central eléctrica habitual	26 kV
Para que se produzca una descarga eléctrica en el aire	30 kV/cm
Valor común que acelera los electrones en un tubo de pantalla	30 kV
En líneas de transmisión en una red de energía eléctrica	138 kV-765kV
Que dan lugar a descargas eléctricas atmosféricas	hasta 1 000 000 kV



Aunque las diferencias o variaciones de una magnitud suelen expresarse utilizando el símbolo Δ , al tratar con los circuitos eléctricos por lo general la diferencia de potencial entre dos puntos no se indica por ΔV , sino simplemente por V . Por ejemplo, en el caso de la situación de la figura 2.11, la diferencia de potencial (o voltaje) entre los extremos de la fuente se escribiría, en lugar de $\Delta V = 12 \text{ V}$, sencillamente $V = 12 \text{ V}$. En lo adelante utilizaremos esta notación.

La diferencia de potencial entre los terminales de los dispositivos eléctricos es uno de los factores que determina la intensidad de corriente en ellos. Esto se pone de manifiesto en un circuito tan simple como el de la figura 2.12: al elevar el voltaje de la fuente, aumentan la intensidad de corriente y la iluminación del bombillo. El voltaje determina no solo el valor de la intensidad de corriente, sino también cómo depende del tiempo. Así, en el circuito de la figura 2.13, como sabes, la corriente no es directa, sino alterna. Ello se debe a que el voltaje entre los terminales del enchufe es alterno, su dependencia con el tiempo es sinusoidal. En este caso el símbolo utilizado para la fuente o generador a la hora de dibujar el diagrama del circuito no es $\text{---}| \text{---}$, sino $\text{---}\text{---}\text{---}$.

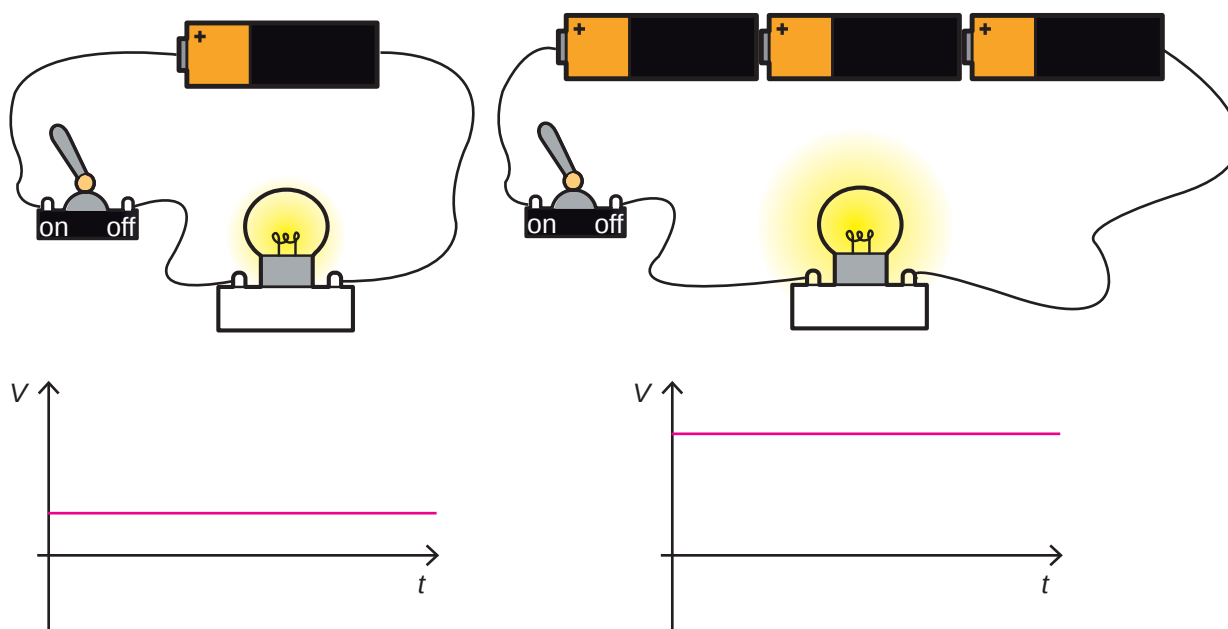


Fig. 2.12. El voltaje en los terminales de un dispositivo es uno de los factores que determina la intensidad de corriente. En (b) el bombillo es el mismo que en (a), pero el voltaje es mayor, por lo que la intensidad de corriente también.

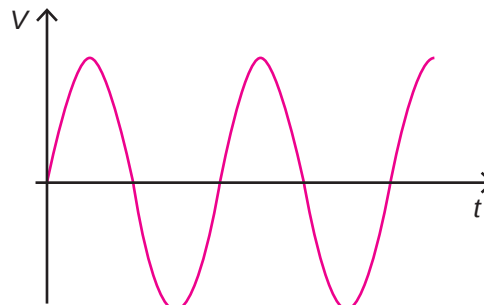
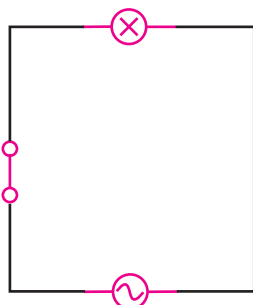


Fig. 2.13. En un bombillo conectado a un enchufe la corriente es alterna, porque el voltaje también lo es.

2.1.4.3. Potencia eléctrica.

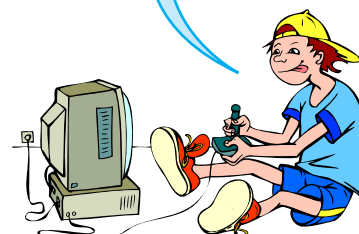
Hemos visto que las **fuentes o generadores** de electricidad en los circuitos **transforman** algún tipo de energía (interna, como en las pilas electroquímicas; cinética, como en las turbinas de las centrales; de radiación, como en los paneles solares; etc.), en energía eléctrica. A su vez, los **receptores, o consumidores, transforman** energía eléctrica en algún otro tipo de energía (de radiación luminosa, como en las lámparas; cinética, como en los motores; de ondas, como en un horno microondas o en las emisoras de radio y televisión). Y como **la magnitud que caracteriza la rapidez con que se transforma la energía es la potencia**, se tiene que:

Potencia eléctrica es la rapidez con que se transforma algún tipo de energía en energía eléctrica (en las fuentes o generadores), o ésta en otros tipos de energía (en los receptores o consumidores).

¿De qué factores dependerá la potencia que desarrolla un receptor eléctrico, o sea, la rapidez con que transforma energía eléctrica en otro tipo?

Con el objetivo de esclarecer la cuestión anterior, consideremos un circuito como el representado en la figura 2.14. El receptor, R , puede ser cualquier dispositivo, un bombillo, un motor, un acumulador que cargamos, etc.

Utiliza los términos “entrada” y “salida” para describir las funciones de las fuentes y los receptores en un circuito eléctrico. Ilustra tu descripción mediante ejemplos concretos.



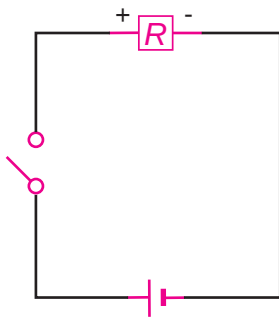


Fig. 2.14. Las partículas cargadas que entran por el terminal positivo del receptor tienen mayor energía potencial que las que salen por su terminal negativo. En el receptor tiene lugar una transformación de energía eléctrica en otros tipos de energía.

Puesto que entre los terminales del receptor hay cierta diferencia de potencial, las partículas positivas (recuerda que aunque se trate de partículas asumimos una corriente de sentido contrario positiva) que llegan a él poseen mayor energía potencial eléctrica que las que salen. ¿Cómo se explica esta disminución de energía potencial? ¿Qué sucede con la energía? Se transforma en otros tipos, por ejemplo, en térmica y luminosa si el receptor es un bombillo, en mecánica si es un motor, en química si es una batería.

Lo dicho sugiere que la energía eléctrica que por unidad de tiempo se transforma en un receptor (la potencia que desarrolla), depende al menos de dos factores: 1) de la **diferencia de potencial**, o **voltaje**, V , entre sus terminales y 2) de la cantidad neta de partículas cargadas que llega a él (y que sale de él) por unidad de tiempo, es decir, de la **intensidad de corriente**, I .

Veamos lo anterior en ecuaciones. Si Δq es la carga que llega al receptor (y sale de él) en cierto intervalo de tiempo Δt , entonces la variación de energía potencial eléctrica en ese tiempo es:

$$\Delta E_p = \Delta qV$$

Por tanto, la potencia que desarrolla el receptor es:

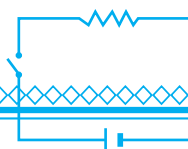
$$P = \frac{\Delta E_p}{\Delta t} = \frac{\Delta qV}{\Delta t} = IV$$

es decir:

$$P = IV$$

En palabras: **la potencia eléctrica que desarrolla un receptor, o una fuente, es directamente proporcional a la intensidad de corriente y a la diferencia de potencial entre sus terminales.**

Como sabes, la unidad básica de potencia es el **watt** (W), pero también se utilizan otras, como el miliwatt (mW), el kilowatt (kW) y el megawatt (MW). En la ecuación $P = IV$, si el voltaje se expresa en **voltio** y la intensidad de corriente en **ampere**, entonces la potencia se obtiene en **watt**.



Los equipos e instalaciones eléctricas traen indicado el valor de la **potencia máxima** para la que fueron diseñados (tabla 2.3). Si se sobrepasan estos valores, pueden producirse serias afectaciones.

Tabla 2.3. Valores de potencia de algunos equipos e instalaciones eléctricos.

Dispositivo o instalación eléctrica	Potencia aproximada
Auricular	5 mW
LED común	30 mW
Bombillo de linterna	5 W
Lámpara “ahorradora”	20 W
Tubos fluorescentes	20 W-40 W
Lámparas de filamento comunes	25 W-100 W
Abanico común	60 W
Televisor	50 W-150 W
Refrigerador	180 W
Lavadora simple	360 W
Plancha eléctrica	300 W-1 000 W
Hornilla eléctrica	600 W-1000 W
Acondicionador de aire	1.5 kW
Primeras centrales eléctricas (1882)	12 kW
Mayores centrales termoeléctricas	1 300 MW

Cuando se conecta un bombillo a una pila o una batería, la potencia que desarrolla permanece constante, ya que el voltaje en sus terminales y la intensidad de corriente también lo son. Sin embargo, la mayoría de los equipos eléctricos se conectan a enchufes cuyo voltaje es alterno. En consecuencia, ni el voltaje ni la intensidad de corriente permanecen constantes y, por tanto, tampoco la potencia. Incluso, cada segundo el valor de la potencia se hace cero muchas veces. Por eso, lo que tiene sentido práctico en estos casos, que son la mayoría, es la **potencia media**. Esta puede escribirse:

$$P_m = I_{ef} V_{ef}$$

donde I_{ef} y V_{ef} son aquellos valores constantes de intensidad de corriente y voltaje, que dan lugar a la misma potencia que la potencia media del voltaje y la corriente alterna. Dichos valores los denominaremos intensidad de corriente y voltaje

Busca en los manuales o en las inscripciones hechas en los propios equipos eléctricos utilizados en tu casa, la potencia para la que fueron diseñados. Compárala con la de dispositivos y equipos similares de la tabla 2.3.





efectivos. Puede demostrarse, aunque por la complejidad de las operaciones no lo haremos, que cuando se trata de **voltajes y corrientes sinusoidales** (Fig. 2.15):

$$I_{\text{ef}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} \approx 0.707I_0 \text{ y } V_{\text{ef}} = \frac{V_0}{\sqrt{2}} \approx 0.707V_0$$

Donde I_0 y V_0 son los valores máximos, o amplitudes, de corriente y voltaje, comúnmente denominados **corriente pico y voltaje pico**.

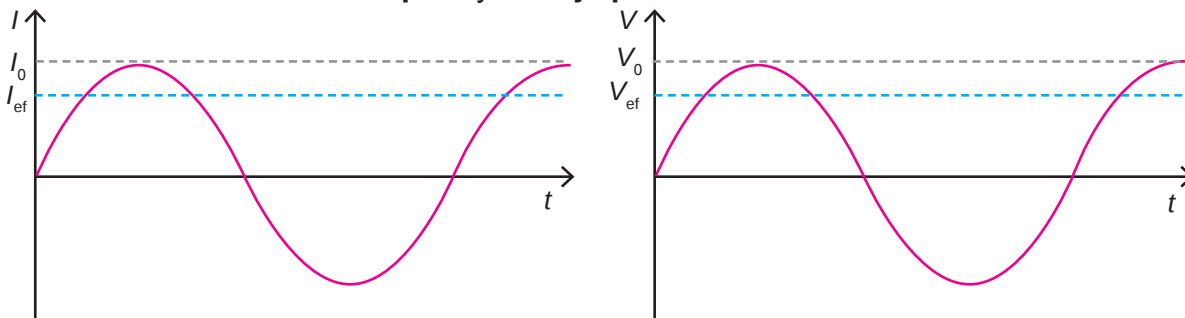


Fig. 2.15. Intensidad de corriente y voltaje sinusoidales. I_0 y V_0 son el voltaje y la corriente picos, I_{ef} y V_{ef} sus valores efectivos, es decir, aquellos que de ser constantes producen la misma potencia que la potencia media de la corriente y el voltaje sinusoidales.

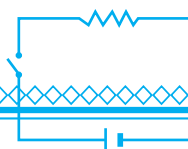
Cuando se dan el voltaje o la intensidad de corriente característicos de cierto dispositivo de corriente alterna, en realidad, aunque no se especifica, se trata de los valores efectivos, es decir, de V_{ef} y I_{ef} . Los valores que indican los instrumentos de medición de voltaje e intensidad de corriente alternos también son los efectivos. De modo que trabajaremos con la ecuación $P = VI$ en situaciones que involucren tanto corriente directa constante como corriente alterna, aunque en este último caso los valores de I y V serán los efectivos.

Ejemplo 2.2. ¿Cuáles serán los voltajes pico en los enchufes de 110 V y de 220 V?

Sabemos que $V_{\text{ef}} = 0.707V_0$

Por consiguiente, en el caso del enchufe de 110 V: $V_0 = \frac{V_{\text{ef}}}{0.707} = \frac{110 \text{ V}}{0.707} = 155 \text{ V}$

Y en el caso del enchufe de 220 V: $V_0 = \frac{V_{\text{ef}}}{0.707} = \frac{220 \text{ V}}{0.707} = 311 \text{ V}$



Ejemplo 2.3. Determina la intensidad de corriente eléctrica de: a) un bombillo de linterna de 5.0 W conectado a 6.0 V, b) un bombillo de filamento de 60 W conectado a la red de 110 V. c) ¿Cómo se explica que si en el bombillo de 60 W la intensidad de corriente es menor, la potencia que desarrolla y la radiación luminosa que emite sean mayores?

a) Para el bombillo de linterna $P = IV$, de donde:

De aquí que:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{5 \text{ W}}{6 \text{ V}} = 0.83 \text{ A}$$

b) Como el bombillo de 60 W se conecta a la red de 110 V, se trata de voltaje y corriente alternos. Sin embargo, como los 110 V, aunque no se especifique, representan un voltaje efectivo, podemos utilizar la misma ecuación que en el caso anterior:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{60 \text{ W}}{110 \text{ V}} = 0.55 \text{ A}$$

c) En el bombillo conectado a la red de 110 V la intensidad de corriente es menor, pero la potencia depende no solo de la intensidad de corriente, sino también del voltaje en los terminales. La diferencia de potencial en los terminales del bombillo de 60 W es mucho mayor.

Ejemplo 2.4. En una casa están funcionando simultáneamente la plancha, el tostador y la secadora de pelo que se muestran en la figura. (a) ¿Soportará el fusible si está diseñado para una corriente máxima de 30 A? (b) Y si además, se enciende el horno de microondas?

(a) La potencia total debida a los tres equipos que están funcionando es:

$$P = 1000 \text{ W} + 1100 \text{ W} + 1000 \text{ W} = 3100 \text{ W}$$

Por consiguiente, la intensidad de corriente es:

$$I = \frac{3100 \text{ W}}{110 \text{ V}} = 28 \text{ A}$$

Como la intensidad de corriente es inferior a 30 A, el fusible soporta.

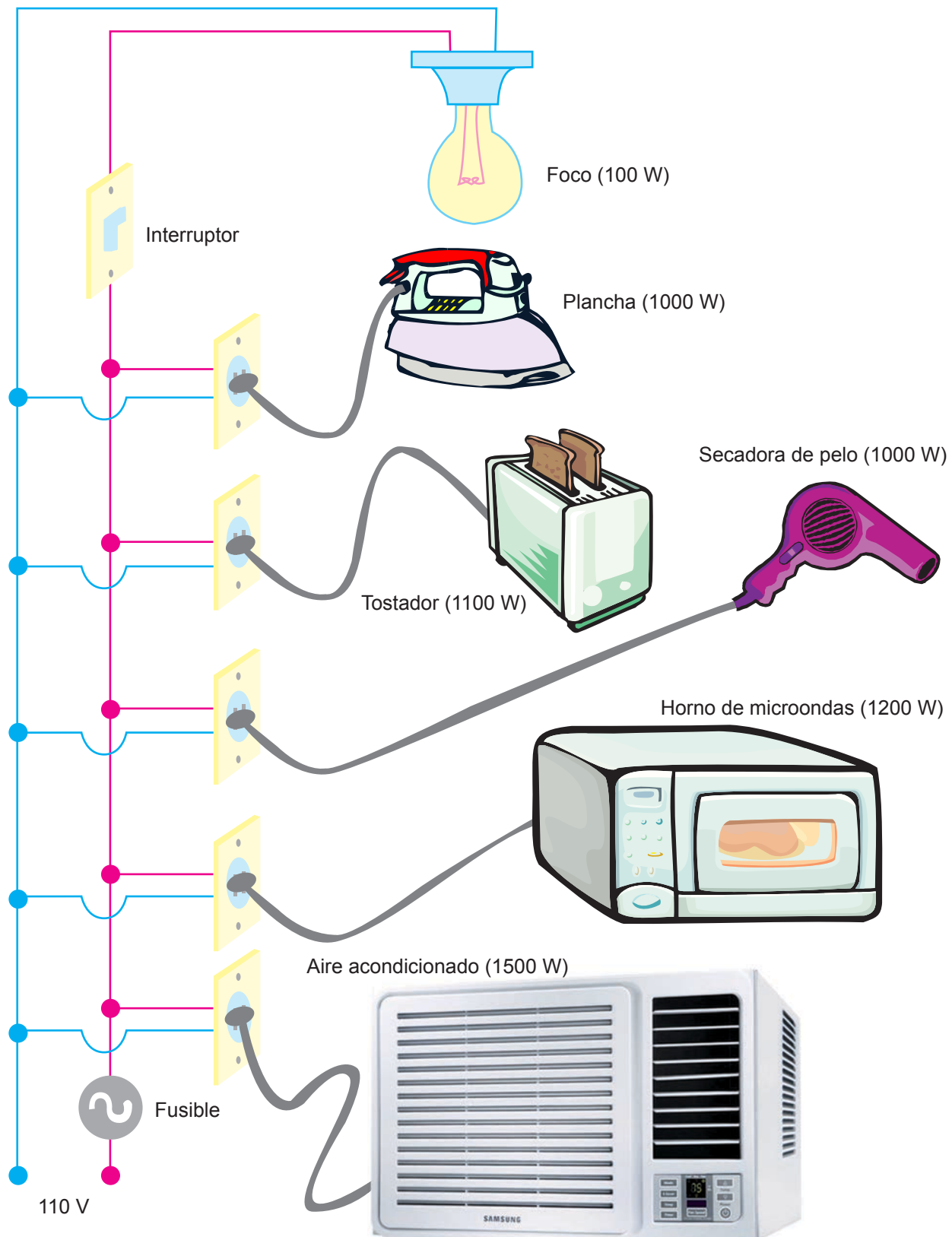
(b) Al conectar además el horno de microondas la potencia total es:

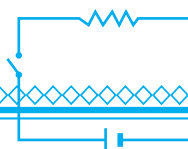
$$P = 3100 \text{ W} + 1200 \text{ W} = 4300 \text{ W}$$

Y la intensidad de corriente

$$I = \frac{4300 \text{ W}}{110 \text{ V}} = 39 \text{ A}$$

El fusible no soporta.





2.1.4.4. Fuerza electromotriz.

Hemos visto que las pilas electroquímicas, las baterías, las celdas solares y otros dispositivos, producen y mantienen una acumulación de carga de signos contrarios en sus terminales, y que esto puede originar un campo eléctrico en el interior de los conductores y, por tanto, una corriente eléctrica. Los generadores de las centrales eléctricas también producen tal acumulación de cargas en sus terminales, gracias a la fuerza ejercida sobre los electrones de sus conductores al moverse en un campo magnético. Estos generadores los estudiaremos en la última unidad. Todos estos dispositivos transforman algún tipo de energía en energía potencial eléctrica.

Los dispositivos que transforman algún tipo de energía (interna, de radiación, térmica, mecánica) en energía potencial eléctrica se denominan con el término genérico *fuentes de fem*. La *fem* (ϵ) en sí misma expresa la *energía que se transforma por cada unidad de carga acumulada en los terminales del dispositivo*.

Las tres letras **f e m** son una abreviatura de “fuerza electromotriz”, término que no refleja adecuadamente el proceso que tiene lugar en las fuentes, ya que no se trata de una fuerza en el sentido usual de esta palabra, sino como hemos dicho, de **energía que se transforma por unidad de carga acumulada**. El término se introdujo hace mucho, cuando aún no se había comprendido bien el funcionamiento de las fuentes, pero se continúa utilizando.

Puesto que la **fem**, igual que el potencial, es energía por unidad de carga, ella también se mide en **voltio**. Sin embargo, estas magnitudes se diferencian una de la otra. Así, cuando se mide con un voltímetro la diferencia de potencial entre los extremos de una pila común, el resultado será 1.5 V (Fig. 2.16a). Sin embargo, si la pila se conecta a un receptor (Fig. 2.16b) y la intensidad de corriente en el circuito es grande, entonces el resultado será inferior. La **fem** de la pila coincide con la diferencia de potencial en sus terminales solo cuando el circuito está abierto, o la intensidad de corriente es muy pequeña. ¿Cómo se explica esto?



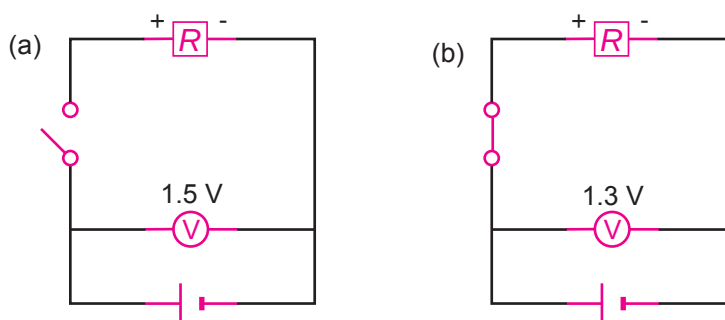
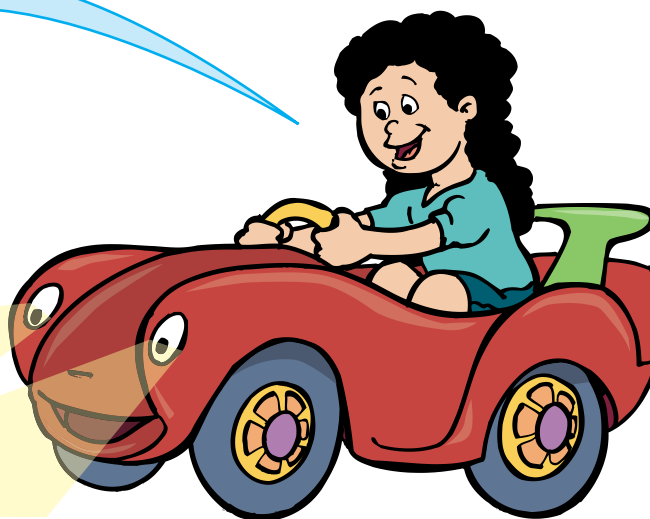
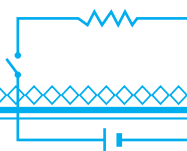


Fig. 2.16. (a) El circuito está abierto y el voltímetro indica la fem de la pila, (b) El circuito está cerrado y el voltímetro indica un valor inferior a la fem de la pila.

Cuando la corriente es grande, la pila no logra restablecer completamente la acumulación de carga en sus terminales, ni por tanto la diferencia de potencial entre ellos. Las partículas cargadas deben moverse en el interior de la pila no solo en contra de la fuerza del campo eléctrico originado por la propia acumulación de carga en sus terminales, sino también en contra de la resistencia que les presentan los átomos y moléculas entre los que se mueven. Si esta resistencia es muy pequeña, entonces la **fem** de la pila prácticamente coincide con la diferencia de potencial entre sus extremos, aún cuando el circuito estuviese cerrado. En los próximos apartados profundizaremos en esta cuestión.

Cuando se acciona el arrancador de un carro con sus faros encendidos, se aprecia una disminución de la cantidad de luz. ¿Qué indica eso acerca del voltaje en los terminales de la batería? ¿Cómo se explica esto?





2.2. Corriente eléctrica en diversos medios.

Los buenos conductores de la electricidad se caracterizan por poseer **gran cantidad de partículas libres con carga eléctrica**. Entre ellos se encuentran los **metales**, los **electrolitos** en disoluciones acuosas y fundidos, y los **gases ionizados**. Los materiales no conductores o aisladores se denominan, como sabes, **dieléctricos**. En comparación con los conductores ellos poseen un número muy pequeño de partículas libres cargadas.

Además de los conductores y dieléctricos, hay otro grupo de materiales cuya conductividad eléctrica ocupa un lugar intermedio entre los conductores y los dieléctricos. No conducen la electricidad tan bien como para llamarse conductores, pero tampoco tan mal como para considerarse dieléctricos, por lo que se han denominado **semiconductores**.

La intensidad de corriente en los metales, electrolitos, gases ionizados y semiconductores, depende de dos factores fundamentales: 1) el **campo eléctrico** que se establece en ellos por medio de una fuente, o lo que es equivalente, la **diferencia de potencial** a que se someten y 2) las **características propias de los materiales**.

A continuación examinamos la naturaleza y las características de la corriente eléctrica en los tipos de materiales anteriormente mencionados.

2.2.1. Corriente eléctrica en los metales. Ley de Ohm.

Los conductores metálicos desempeñan un importantísimo papel en la transmisión de la energía eléctrica de las fuentes hasta los numerosos equipos eléctricos que se utilizan diariamente. Además, forman parte esencial de la construcción de motores, generadores, calentadores eléctricos y otros equipos.

Como sabes, en los metales hay una enorme cantidad de electrones libres moviéndose desordenadamente. Un centímetro cúbico de cobre, por ejemplo, contiene 8.4×10^{22} de

Ejemplifica el uso de los conductores metálicos para las transmisión de energía eléctrica.





tales electrones, los cuales a la temperatura ambiente se mueven aleatoriamente con una velocidad media de más de 1000 km/s . Analicemos desde el punto de vista microscópico lo que sucede cuando se conecta una fuente de **fem** a los extremos de un conductor metálico.

La fuente origina un campo eléctrico en el interior del conductor y al movimiento desordenado que tenían sus electrones libres, ahora se adiciona un movimiento dirigido hacia el polo positivo de la fuente. Si la diferencia de potencial entre los extremos del conductor permanece constante, la velocidad media del movimiento orientado de los electrones alcanza cierto valor y luego se mantiene constante. Los electrones continuamente chocan con los iones de la red de iones a través de la cual se desplazan y esto impide que dicha velocidad crezca. La resistencia que presentan los iones al movimiento orientado de los electrones es análoga a la que presenta el agua al movimiento de una piedra que se deja caer a través de ella. Los electrones continuamente transmiten la energía cinética que reciben del campo eléctrico a los iones de la red, lo que puede conducir al calentamiento del conductor.

El análisis anterior sugiere importantes conclusiones acerca de las magnitudes de que depende la intensidad de corriente en los conductores metálicos y la forma de estas dependencias.

La velocidad media del movimiento orientado de los electrones libres, v_m , es proporcional a la intensidad del campo eléctrico y, por tanto, a la diferencia de potencial entre los extremos del conductor. En símbolos:

$$v_m \propto V$$

Y puesto que la intensidad de corriente es, a su vez, proporcional a la velocidad media del movimiento de los electrones, se tiene:

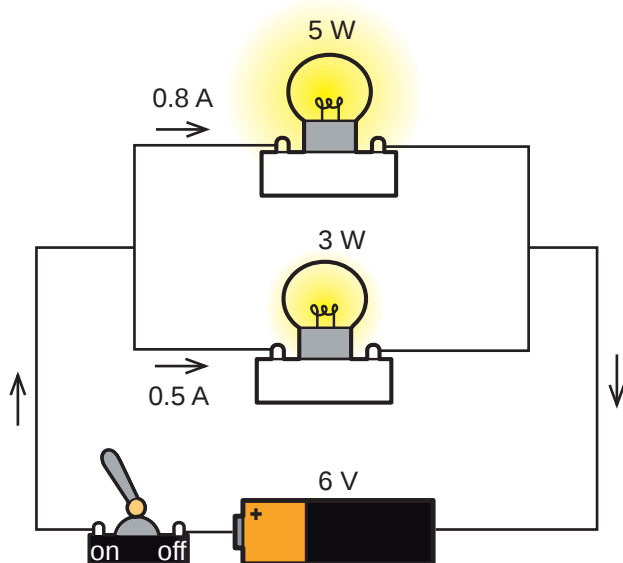
$$I \propto V$$

La relación de proporcionalidad directa, independientemente de la polaridad de la fuente, entre la intensidad de corriente y la diferencia de potencial en los extremos de un conductor se denomina **ley de Ohm**, en honor de Georg S. Ohm, científico alemán que llegó a ella experimentalmente en 1827 para los conductores metálicos.

Pero la intensidad de corriente en los conductores depende, obviamente, no solo de un factor externo, la fuente de **fem**, sino también de **características propias de los conductores**. Así, al aplicar igual voltaje a los extremos de diferentes conductores metálicos, la intensidad de corriente no es la misma. Esto se hace evidente en un circuito como el representado en la figura 2.17. La diferencia de potencial en los extremos de los filamentos de ambos bombillos es igual, pero en el filamento del que da más luz la intensidad de corriente es mayor. Del filamento en que la intensidad de corriente es menor se dice que tiene mayor resistencia a la corriente eléctrica, o simplemente, mayor **resistencia eléctrica**.



Georg S. Ohm (1787-1854). Físico alemán, conocido sobre todo por sus investigaciones relativas a la corriente eléctrica. En su honor, la relación de proporcionalidad entre la intensidad de corriente en un conductor y la diferencia de potencial entre sus extremos se denomina *ley de Ohm* y la unidad de resistencia eléctrica, *ohm*.



Realiza los cálculos y comprueba que en el diagrama de la figura 2.17 las intensidades de corriente en los bombillos son las indicadas.



Fig. 2.17. La diferencia de potencial en los extremos de los filamentos de ambos bombillos es la misma, pero las intensidades de corriente son diferentes porque dependen de las características de dichos filamentos.

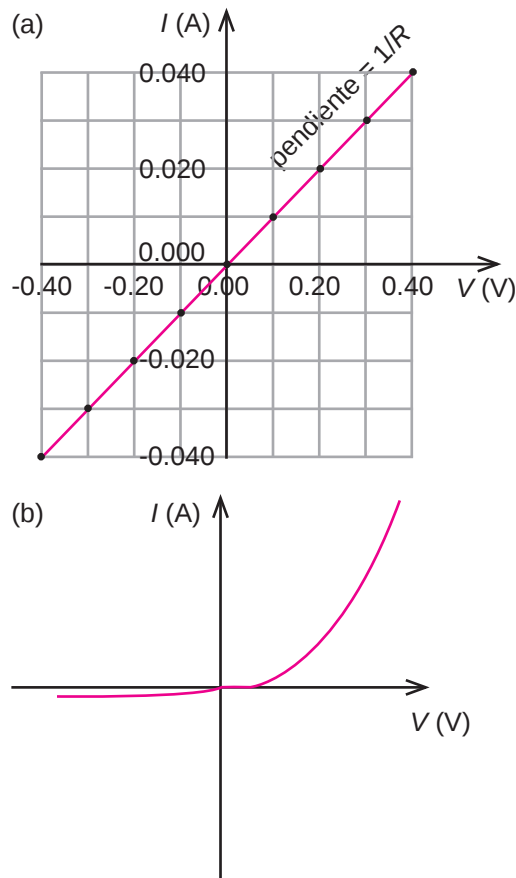


Fig. 2.18. Características volt-ampéricas de: (a) un conductor metálico, (b) un diodo semiconductor. El conductor metálico es un dispositivo óhmico mientras que el diodo semiconductor, no.

Determina la resistencia eléctrica del conductor metálico cuya característica volt-ampérica se representó en la figura 2.18a.



La **resistencia eléctrica** de un conductor representa una medida de su oposición al establecimiento de una corriente eléctrica en él y se define como:

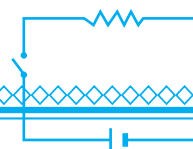
$$R = \frac{V}{I}$$

Según esta ecuación, la unidad de resistencia eléctrica es 1 V/A. Esta unidad recibe el nombre especial de **ohm**, y se simboliza por la letra mayúscula griega, **omega** (Ω).

La ecuación anterior también puede escribirse:

$$I = \frac{V}{R}$$

Esta es la forma más habitual de escribir **la ley de Ohm**, es decir, la proporcionalidad entre I y V . Claro está, **la ley se cumple solo si R permanece constante**, hecho que como hemos dicho encontró Ohm para los conductores metálicos, pero que no se cumple para otros muchos dispositivos eléctricos, y ni siquiera para los propios conductores metálicos si el paso de la corriente los calienta, como es el caso, por ejemplo, del filamento de los bombillos. En la figura 2.18 se muestran los gráficos de $I(V)$ para un conductor metálico cuya temperatura permanece constante y para un **diodo semiconductor**. La dependencia entre I y V para un dispositivo eléctrico suele denominarse **característica volt-ampérica** del dispositivo. Si ésta es una línea recta que pasa por el origen, como para un conductor metálico cuya temperatura no varía (Fig. 2.18a), significa que el dispositivo cumple con la ley de Ohm y se dice que es **óhmico**. Un diodo semiconductor es un dispositivo no óhmico, pues no cumple con la ley de Ohm (Fig. 2.18b). La mayoría de los dispositivos electrónicos modernos son no óhmicos.



Ejemplo 2.5. Determina la resistencia eléctrica del filamento de los bombillos representados en la figura 2.17.

La ecuación de definición de la resistencia eléctrica es $R = V/I$. La diferencia de potencial V en los extremos de los filamentos de los bombillos se conoce, pero la intensidad de corriente I debe ser hallada. De la ecuación $P = IV$:

$$I = \frac{P}{V}$$

Sustituyendo esta expresión en la ecuación de definición de la resistencia:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{V}{\frac{P}{V}} = \frac{V^2}{P}$$

Colocando los valores numéricos en la ecuación se tiene:

Para el bombillo de 5 W: $R = \frac{V^2}{P} = \frac{(6 \text{ V})^2}{5 \text{ W}} = 7 \Omega$

Para el bombillo de 3 W: $R = \frac{V^2}{P} = \frac{(6 \text{ V})^2}{3 \text{ W}} = 12 \Omega$

Nota que, al contrario de lo que a veces se piensa, el bombillo de menor resistencia es el que ilumina más. Siendo igual la diferencia de potencial en los terminales de ambos bombillos, la intensidad de corriente es mayor en el que tiene menor resistencia.

Cabe ahora preguntarse: *¿y de qué características de los conductores metálicos depende la resistencia eléctrica?*

Razonando a partir de los conocimientos que ya tienes, seguramente puedes llegar a algunas **hipótesis** al respecto.

Imagina primeramente dos pedazos de un mismo alambre, de diferentes longitudes (Fig. 2.19a). Si se aplican entre sus extremos iguales diferencias de potencial, en el más largo la intensidad de campo eléctrico será menor (Te dejamos de tarea que argumentes por qué). Ello implica que la velocidad media del movimiento orientado de sus electrones libres y, por tanto, la intensidad de corriente, también es menor. Puesto que con la misma diferencia de



potencial V entre sus extremos, la intensidad de corriente es menor en el alambre más largo, entonces, según la ecuación $R = V/I$, dicho alambre tendrá mayor resistencia eléctrica. La hipótesis a que llegamos podría ser, pues, que **la resistencia eléctrica es proporcional a la longitud del conductor** ($R \propto L$)

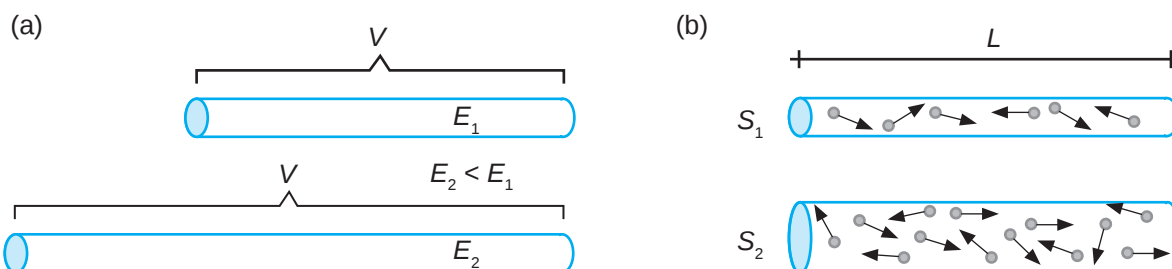
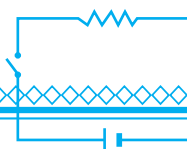


Fig. 2.19. (a) Si aplican iguales diferencias de potencial entre los extremos de dos pedazos con diferentes longitudes de un mismo alambre, la intensidad de campo eléctrico será menor en el alambre de mayor longitud. (b) En el alambre más grueso hay más electrones libres disponibles para atravesar su sección transversal.

Si ahora piensas en dos alambres de un mismo material e iguales longitudes, pero uno más grueso que el otro (Fig. 2.19b), es decir, con mayor área de su sección transversal, no te será difícil admitir que en el más grueso hay más electrones libres disponibles para atravesar la sección transversal, por lo que al aplicar iguales diferencias de potencial a sus extremos, la intensidad de corriente debe ser mayor. Ahora la hipótesis puede ser que **la resistencia es inversamente proporcional al área de la sección transversal del conductor** ($R \propto 1/S$)

La interpretación microscópica de la corriente eléctrica en los metales también lleva a suponer que **la resistencia eléctrica depende de la naturaleza del material**. En particular, en uno que tenga mayor cantidad de electrones libres por unidad de volumen y en que los electrones se muevan más fácilmente a través de la red de iones, la resistencia debe ser menor. Por último, como al aumentar la temperatura aumenta la velocidad media del movimiento desordenado de los iones de la red de iones y de los propios electrones, es de esperar que la resistencia eléctrica aumente con la temperatura.



Los experimentos confirman las hipótesis anteriores. La resistencia eléctrica de un conductor metálico de longitud L con igual área S de su sección transversal a todo su largo es:

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

donde el coeficiente ρ , denominado **resistividad eléctrica**, depende del material y también de la temperatura. Así, por ejemplo, un alambre de **wolframio**, también denominado **tungsteno**, que es el metal de que están constituidos los filamentos de los bombillos, tiene una resistividad más de tres veces mayor que la del cobre. El **nicromo**, aleación de níquel y cromo utilizada en algunos elementos calefactores, posee una resistividad más de 100 veces mayor que la del cobre. Por otra parte, a la temperatura de 3 000 °C que puede alcanzar el filamento de un bombillo su resistividad aumenta unas 10 veces en comparación con la que tiene a temperatura ambiente.

¿A qué crees tú que se deba la utilización del wolframio para confeccionar los filamentos de los bombillos?

¿Podrías hacer estimados de las resistencias a temperatura ambiente de los bombillos de la experiencia representada en la figura 2.17 (Utiliza los resultados obtenidos en el ejemplo 2.5).



Ejemplo 2.6. Imagina que vas a conectar las bocinas de tu equipo estéreo a gran distancia de él y que para ello utilizarás alambres de cobre de 20 m. a) Si se requiere que la resistencia de cada alambre sea de 0.10 Ω (o inferior), ¿qué diámetro deben tener los alambres? b) Si la intensidad de corriente en cada bocina es 2.0 A, ¿cuál es la diferencia de potencial, o caída de voltaje, en cada alambre en caso que la resistencia de ellos sea 0.10 Ω ? La resistividad del cobre es $\rho = 1.68 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$.

La resistencia del alambre de cobre es:

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

De aquí que:

$$S = \rho \frac{L}{R}$$

Por consiguiente, para que un alambre de cobre de 20 m de largo tenga una resistencia de 0.10 Ω el área de su sección transversal debe ser:



$$S = \rho \frac{L}{R} = 1.68 \times 10^{-8} \, \Omega \text{m} \frac{20 \, \text{m}}{0.10 \, \Omega} = 3.36 \times 10^{-6} \, \text{m}^2$$

Como la sección transversal del alambre es circular, el área es:

$$S = \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2, \text{ donde } d \text{ es el diámetro del alambre}$$

Resolviendo para d :

$$d = 2 \sqrt{\frac{S}{\pi}} = 2 \sqrt{\frac{3.36 \times 10^{-6} \, \text{m}^2}{\pi}} = 2.1 \times 10^{-3} \, \text{m} = 2.1 \, \text{mm}$$

b) Puesto que $I = \frac{V}{R}$, se tiene:

$$V = RI = (0.10 \, \Omega)(2.0 \, \text{A}) = 0.20 \, \text{V}$$

2.2.2. Corriente eléctrica en los electrólitos.

Como los sólidos, hay líquidos dieléctricos, conductores y semiconductores. El agua destilada, por ejemplo, es un dieléctrico, es decir, no conductora. Sin embargo, si se disuelve en ella un **electrolito** (ácidos, bases, sales), entonces se vuelve conductora. Bajo la acción de las moléculas polares del agua, las moléculas del electrolito se separan en iones. Los iones positivos y negativos que aparecen en el agua son las partículas cargadas que originan la corriente eléctrica en los electrolitos. La proporción de moléculas que se separan en iones depende de la concentración de la disolución y de su temperatura. Con el aumento de esta última, aumenta la disociación de las moléculas y la cantidad de iones en el líquido, por eso, a diferencia de lo que ocurre en los metales, al aumentar la temperatura de una disolución electrolítica crece la concentración de partículas cargadas y disminuye su resistencia eléctrica.

Cuando se conecta una fuente de corriente directa a una disolución electrolítica (Fig. 2.20), los iones negativos (aniones) comienzan a moverse hacia el electrodo positivo

(ánodo) y los iones positivos (cationes) hacia el electrodo negativo (cátodo). Como resultado de esto, se establece una corriente eléctrica. A diferencia de los metales, en este caso la corriente eléctrica conlleva un **transporte de sustancia**. En los electrodos introducidos en la disolución, tiene lugar la separación de las sustancias que forman el electrolito, en el electrodo positivo los iones negativos entregan sus electrones en exceso y en el negativo, los iones positivos adquieren los electrones que les faltan. Este proceso se conoce como **electrólisis**.

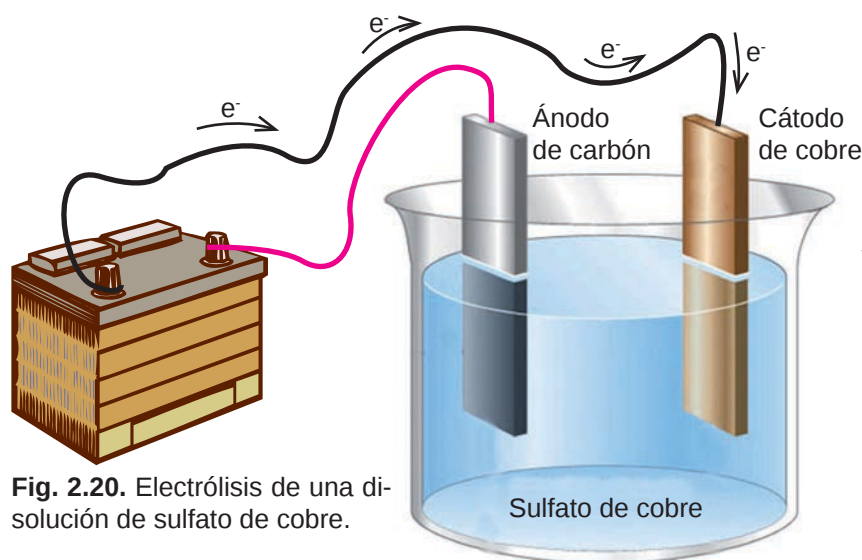


Fig. 2.20. Electrólisis de una disolución de sulfato de cobre.

Si la temperatura del electrolito permanece constante, la dependencia entre la intensidad de corriente y la diferencia de potencial de los electrodos, $I(V)$, cumple con la ley de Ohm. El gráfico de la característica volt-ampérica de un electrolito es una línea recta que pasa por el origen de coordenadas, igual que en los conductores metálicos cuando la temperatura de ellos se mantiene constante.

La electrólisis tiene múltiples aplicaciones tecnológicas. Por medio de ella es posible recubrir un cuerpo metálico con una fina capa de otro metal (Fig. 2.21), como por ejemplo, en el niquelado o el cromado. Estos recubrimientos protegen las superficies de la corrosión y le dan belleza. Con ayuda de la electrólisis pueden librarse de impurezas ciertos metales. La obtención del aluminio, tan utilizado hoy en la tecnología y la vida diaria, se realiza mediante electrólisis a partir de la bauxita.

¿Por qué en el texto se especificará que la fuente que se conecta a la disolución electrolítica para realizar su electrólisis es de corriente directa? ¿Qué sucedería si la corriente fuese alterna?





Fig. 2.21. Recubrimiento de cuerpos con una capa de metal mediante electrólisis.

Indaga en Internet sobre las aplicaciones de la electrólisis.



¿De qué depende la masa de sustancia obtenida en los electrodos durante una electrólisis?

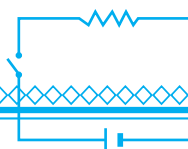
Es evidente que de la cantidad de carga entregada, u obtenida, por los electrodos. Si la intensidad de la corriente eléctrica que pasa por el electrolito es I , entonces al cabo del tiempo Δt dicha carga será:

$$\Delta q = I \Delta t$$

Esta carga, dividida entre la de un ión, q_{ion} , da el número de iones que se neutraliza en cada electrodo, es decir, el número N de átomos o moléculas que se obtiene:

$$N = \frac{\Delta q}{q_{\text{ion}}} = \frac{I \Delta t}{q_{\text{ion}}}$$

A su vez, la carga q_{ion} de cada ión depende del número de electrones en exceso o defecto que él posee, es decir, de su valencia n . Así, al disociarse la molécula de sal común,



ClNa, aparecen los iones Cl^- y Na^+ ($n = 1$), con cargas de igual magnitud que la del electrón. Pero al disociarse la molécula de sulfato de cobre, los iones son Cu^{2+} y SO_4^{2-} ($n = 2$), con cargas dos veces la del electrón. En general:

$$q_{\text{ion}} = ne$$

Por consiguiente:

$$N = \frac{I\Delta t}{ne}$$

Si ahora multiplicamos el número N de átomos, o moléculas, obtenido en uno de los electrodos por la masa m de cada átomo, o molécula, se tiene la masa M de sustancia separada del electrolito.

$$M = Nm = \frac{mI\Delta t}{ne} = \left(\frac{m}{ne} \right) I\Delta t$$

Observa que la expresión entre paréntesis es constante para cada electrolito. Si la designamos por k puede escribirse:

$$M = kI\Delta t$$

En palabras:

La masa de sustancia obtenida en cada electrodo durante una electrólisis es proporcional a la intensidad de la corriente eléctrica y al tiempo.

Esta conclusión, a la que hemos llegado teóricamente, fue establecida por primera vez, experimentalmente, por Faraday y por eso se denomina **ley de Faraday de la electrólisis**.

La constante $k = m/ne$ se denomina **equivalente electroquímico** y tiene una interpretación física simple: puesto que m es la masa de un ión y ne su carga, entonces **el equivalente electroquímico es el cociente entre la masa y la carga del ión**.

Nota que en la expresión $M = (m/ne)I\Delta t$ interviene la carga e del electrón. Por eso, midiendo la masa M de sustancia obtenida en el electrodo, la intensidad de la corriente I y



el tiempo Δt durante el que pasa, es posible determinar la carga del electrón. Los valores de las otras magnitudes, la masa m de los átomos, o moléculas, separados del electrolito y la valencia n , son conocidos. En el apartado dedicado a las actividades prácticas, al final del libro, se describe una práctica de laboratorio para determinar la carga del electrón.

Ejemplo 2.7. En una solución de sulfato de cobre se introducen dos electrodos de cobre y se hace pasar una corriente constante de 1.8 A durante 30 min. La masa del electrodo negativo antes de la electrólisis era 15.2 g y después 16.3 g. Determina la carga del electrón. La masa de un átomo de cobre es 1.05×10^{-25} kg, la valencia del ión de cobre 2 y la carga del electrón 1.6×10^{-19} C.

La masa de sustancia depositada en el electrodo negativo es:

$$M = \left(\frac{m}{ne} \right) I \Delta t$$

Donde m es la masa del átomo de sustancia depositada, n la valencia de su ión, e la carga del electrón, I la intensidad de corriente y Δt el tiempo durante el que pasa.

Resolviendo la ecuación para e se tiene:

$$e = \frac{m I \Delta t}{n M}$$

La masa de cobre depositada en el electrodo es:

$$M = 16.3 \text{ g} - 15.2 \text{ g} = 1.1 \text{ g} = 1.1 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

El tiempo durante el cual pasa la corriente:

$$\Delta t = 30 \text{ min} \times \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} = 1800 \text{ s}$$

Sustituyendo todos los datos en la ecuación:

$$e = \frac{m I \Delta t}{n M} = \frac{(1.05 \times 10^{-25} \text{ kg})(1.8 \text{ A})(1800 \text{ s})}{(2)(1.1 \times 10^{-3} \text{ kg})}$$

$$e = 1.5 \times 10^{-19} \text{ C}$$

La diferencia entre este valor y el conocido por ti, $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C, probablemente se debe a que la masa no se midió con gran precisión, sino solo hasta las décimas de gramo.

2.2.3. Corriente eléctrica en los gases.

Electriza dos tiras de acetato frotándolas y luego suspéndelas, agarrándolas juntas por un extremo con dos dedos (Fig. 2.22a). Las tiras se separan formando una V invertida. Si ahora calientas el aire entre ellas, por ejemplo, acercando por abajo un cerillo encendido (Fig. 2.22b), las tiras se aproximan rápidamente, lo que evidencia que se **descargan** y, por tanto, que pasa corriente eléctrica a través del aire. El paso de corriente eléctrica a través de un gas se denomina **descarga eléctrica**.

Los gases pueden hacerse conductores no solo calentándolos, sino también mediante radiación: ultravioleta, de rayos X, radiactiva. ¿Cómo se explica esto? En las condiciones habituales, los gases están constituidos casi por completo por átomos o moléculas neutros y, por tanto, son dieléctricos. Sin embargo, el calentamiento o la radiación, hacen que parte de sus átomos emitan electrones, con lo cual aparecen iones positivos y electrones. Pueden incluso formarse también iones negativos, producto de la unión de electrones emitidos con átomos neutros. La naturaleza de la corriente eléctrica en los gases es similar a la de los electrolitos. La diferencia básica consiste en que mientras en los electrolitos los portadores de carga, tanto negativa como positiva son iones, **en los gases los portadores de carga son iones y electrones**.

Para estudiar las características de la corriente eléctrica en los gases puede utilizarse un tubo de vidrio que contiene gas y que tiene un electrodo en cada extremo, los cuales se conectan a una fuente de fem (Fig. 2.23). Supongamos ahora que el gas en el interior del tubo se ioniza, utilizando por ejemplo radiación. En la figura 2.24 se muestra la forma que tiene el gráfico de la **característica voltampérica**. Cuando se eleva la diferencia de potencial entre los electrodos, al principio la intensidad de corriente aumenta proporcionalmente (se cumple la ley de Ohm). En ese intervalo, la cantidad de partículas cargadas disponibles es mayor que la necesaria para la corriente eléctrica. Sin embargo, al crecer la intensidad de corriente, llega un momento que la cantidad de partículas cargadas que

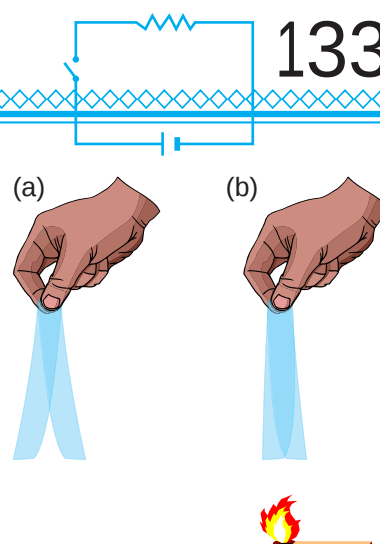


Fig. 2.22. (a) Dos tiras de acetato electrizadas con cargas del mismo signo se mantienen separadas, lo que muestra que el aire es dieléctrico, (b) al calentar el aire, las tiras se descargan, lo que evidencia que el aire se ha vuelto conductor.

¿Cómo pudieras explicar desde el punto de vista microscópico la ionización de un gas al ser calentado?





arriba a los electrodos en la unidad de tiempo, se iguala a la cantidad generada en ese tiempo y entonces la posterior elevación del voltaje ya no puede producir un aumento de la intensidad de corriente. Se dice que la corriente ha alcanzado la **saturación**. Si la acción del ionizador cesa, desaparece la corriente eléctrica, por lo que este tipo de corriente en los gases suele denominarse **corriente o descarga mantenida**.

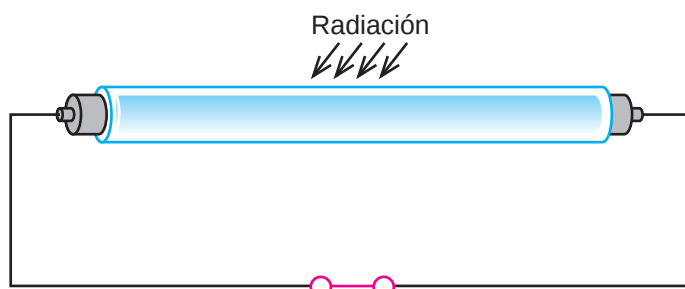


Fig. 2.23. Esquema de un dispositivo que permite estudiar la corriente eléctrica en los gases.

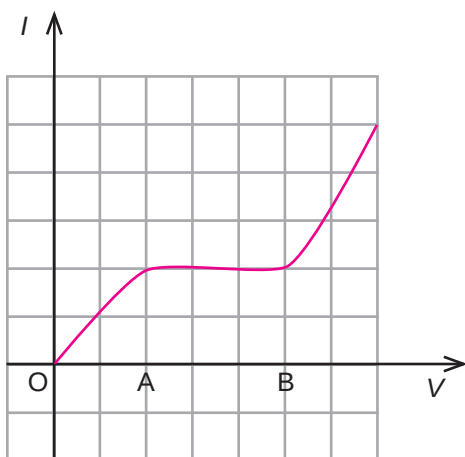
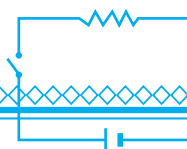


Fig. 2.24. Característica voltampérica de un gas contenido en un tubo y sometido a un agente ionizante. El tramo OAB corresponde a la corriente mantenida, ya que requiere del ionizador. A partir de B la corriente es automantenida, fundamentalmente debido a la emisión de electrones por el electrodo negativo.

¿Qué sucede si se continúa elevando el voltaje entre los electrodos? La experiencia muestra que a partir de cierto valor la intensidad de corriente nuevamente crece. Esto indica que han comenzado a generarse más partículas cargadas que las que origina el agente ionizador. La intensidad de corriente puede hacerse cientos y miles de veces mayor que la de saturación y la cantidad de partículas con cargas tan grande, que incluso ya no se necesite la acción del ionizador para mantener la corriente. Si en estas condiciones el ionizador se retira, la corriente se mantiene. Por eso este tipo de corriente en los gases se denomina **corriente o descarga automantenida**.

¿Cómo se explica el nuevo aumento de la intensidad de corriente luego de la saturación? En el camino hacia el electrodo positivo, los electrones constantemente chocan con iones y átomos neutros, pero al elevar el voltaje, aumenta la intensidad de campo eléctrico en el gas, y con ella la energía que adquieren los electrones entre un choque y el siguiente. Esta energía puede llegar a ser tal, que al chocar el electrón con un átomo neutro lo ionice, es decir, que haga que pierda un electrón. Como resultado de esto, el número de partículas cargadas aumenta y la intensidad de corriente comienza a crecer. Sin embargo, comprenderás que tal aumento de la intensidad de corriente no puede mantenerse a costa de la



ionización de los átomos del gas. Llegaría un momento en que todos los electrones emitidos por los átomos neutros han llegado al electrodo positivo y desaparecido del gas. El aumento de la intensidad de corriente se mantiene debido a que **el electrodo negativo emite electrones**. Al elevarse la diferencia de potencial, no solo aumenta la energía de los electrones sino también la de los iones que viajan hacia el electrodo negativo. Sus choques a grandes velocidades con el electrodo negativo pueden originar que este emita electrones debido a dos factores: 1) los choques en sí mismos y 2) el calentamiento del electrodo provocado por los choques.

Indaga en alguna enciclopedia acerca del funcionamiento del arco eléctrico y la lámpara fluorescente.

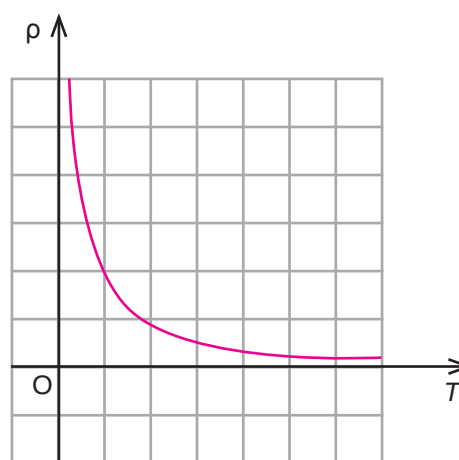


En muchos casos de corriente eléctrica en los gases, como por ejemplo en las lámparas fluorescentes y en los arcos eléctricos, el calentamiento de los electrodos con la consiguiente emisión de electrones es condición previa para que se inicie la corriente eléctrica en el gas. El calentamiento de los electrodos se realiza haciendo pasar por ellos corriente eléctrica.

2.2.4. Corriente eléctrica en los semiconductores.

Los semiconductores pueden ser elementos químicos, como el silicio (Si), el germanio (Ge) y el selenio (Se), o compuestos, como el sulfuro de cadmio (CdS), el sulfuro de plomo (PbS) y otros.

Una de las características esenciales de los semiconductores es la disminución de la resistividad ρ con el aumento de temperatura. La figura 2.25 muestra la forma del gráfico de dependencia de la resistividad con la temperatura para un semiconductor.



¿Cómo se explica la disminución de la resistividad con la temperatura? Ya sabes que la disponibilidad de partículas libres cargadas en un material determina su resistividad. Por consiguiente, es de esperar que al aumentar la temperatura del semiconductor aumente la cantidad de partículas libres cargadas en él. Y en efecto, eso es lo que ocurre, veamos la razón.

Fig. 2.25. Una característica esencial de los semiconductores es la rápida disminución de la resistividad con la temperatura.



Consideremos como ejemplos de semiconductores el silicio y el germanio. La valencia de estos elementos es 4, lo que significa que en la capa electrónica más externa de sus átomos hay esa cantidad de electrones. Estos electrones dan lugar a enlaces covalentes entre los átomos, cada uno se enlaza con otros cuatro, constituyendo una estructura cristalina (Fig. 2.26a). Cabe subrayar que al formarse estos enlaces, los electrones de valencia de un átomo dado dejan de pertenecer a ese átomo, ni siquiera pertenecen a dos átomos, se mueven por cada uno de los vecinos. Más aún, al llegar a uno de los átomos vecinos, pueden desplazarse hasta el vecino siguiente y así sucesivamente. Este desplazamiento de los electrones por la red de enlaces es desordenado. De modo que los electrones de valencia, similarmente a lo que ocurre en los metales, no pertenecen a un átomo determinado, sino a la red, **pero a diferencia de los metales, si la temperatura es muy baja no constituyen electrones libres, permanecen bien ligados a la red de enlaces**. Esto explica por qué a bajas temperaturas el silicio y el germanio son dieléctricos.

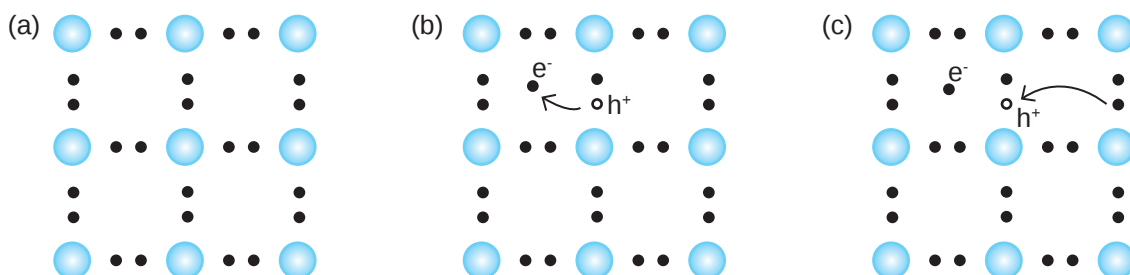
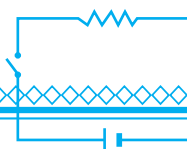


Fig. 2.26. a) Esquema plano de la estructura de una porción de cristal de silicio. Si la temperatura es muy baja, apenas se forman electrones libres. (b) Con la elevación de temperatura los enlaces se rompen, formándose electrones libres y huecos. (c) Los electrones que forman los enlaces no permanecen fijos, sino que se desplazan por la red de enlaces, sin embargo, si la temperatura es muy baja permanecen bien ligados, no constituyen electrones libres.

Con la elevación de temperatura, la energía cinética de los electrones de valencia aumenta y los enlaces pueden romperse (Fig. 2.26b). **A mayor temperatura, mayor número de electrones que dejan los enlaces y se convierten en electrones libres**. Por ejemplo, al calentar una porción de silicio desde la temperatura ambiente hasta unos 400 °C, el número de electrones libres crece de $10^{11}/\text{cm}^3$ a $10^{18}/\text{cm}^3$, es decir, unos diez millones de veces, por lo que su resistencia eléctrica disminuye enormemente.



Los electrones que dejan los enlaces originan defecto de ellos en la red de enlaces. Lo usual es decir que se producen **vacancias**, o **huecos** (Fig. 2.26b). Puesto que los huecos constituyen defecto de electrones, ellos pueden ser considerados con carga positiva. Por otra parte, los electrones que intervienen en los enlaces, al desplazarse por la red de enlaces, van pasando por esos huecos (Fig. 2.26c). Nota que el desplazamiento de un electrón de cierto enlace a un hueco, implica el desplazamiento del hueco en sentido opuesto. De modo que la posición de los huecos en la red no es fija. Como los electrones que se mueven por la red de enlaces lo hacen desordenadamente, los huecos también.

Pero la resistencia de un semiconductor puede disminuir no solo con el aumento de temperatura, sino también de la iluminación. Este efecto no está relacionado con el calentamiento del semiconductor al incidir sobre él la luz, pues se produce aún cuando la temperatura se mantenga constante. Su origen igualmente está en la ruptura de los enlaces de los átomos, pero en este caso debido a la energía comunicada a los electrones por los corpúsculos luminosos, denominados **fotones**. Dicho efecto se llama **efecto fotoeléctrico**.

En el semiconductor se tienen así, ya sean generados por el aumento de temperatura o de la iluminación, electrones libres con carga negativa y huecos con carga positiva, ambos moviéndose desordenadamente. Al aplicar una diferencia de potencial al semiconductor, el campo eléctrico originado en su interior orienta el movimiento ellos, formándose **una corriente eléctrica de electrones libres y de huecos**. El movimiento de los huecos es en sentido contrario al de los electrones.

La fuerte dependencia de la resistencia eléctrica de los semiconductores con la temperatura se utiliza para detectar variaciones de ésta, o para medirla. Los dispositivos diseñados con este fin se denominan **termistores**, o **termorresistores**. Ellos constituyen uno de los dispositivos semiconductores más simples, se emplean en alarmas de fuego, control de temperatura a distancia, termómetros digitales.

Explica con tus propias palabras por qué disminuye la resistencia eléctrica de un semiconductor con el aumento de temperatura o de la iluminación.





Profundiza con ayuda de una enciclopedia, o de Internet, en las aplicaciones de los termistores y las fotorresistencias.



Los dispositivos que utilizan el efecto fotoeléctrico en los semiconductores se denominan **fotorresistores** o **fotorresistencias**. Se emplean en muy diversas ramas de la ciencia y la tecnología: como detectores de luz, por ejemplo, para activar o desactivar el sistema de alumbrado público; para evaluar la calidad de ciertas superficies, etc.

Pese a que en los semiconductores el número de portadores de carga crece con la temperatura y la iluminación, en condiciones normales es todavía demasiado pequeño como para que sean buenos conductores. Por ejemplo, vimos que a temperatura ambiente en el silicio hay $10^{11}/\text{cm}^3$ electrones libres, pero este número es insignificante si se compara con el correspondiente al cobre: $8.4 \times 10^{22} / \text{cm}^3$.

Sin embargo, **introduciendo determinado tipo de impurezas en el semiconductor, es posible elevar enormemente el número de electrones libres o el número de huecos en él**. Consideremos un cristal de silicio en el que se introducen, por ejemplo, átomos de fósforo (P). Los átomos de este elemento tienen 5 electrones de valencia, 4 de ellos participan en enlaces covalentes con los de silicio y el quinto, se convierte en un electrón libre (Fig. 2.27a). Cada átomo de fósforo aporta un electrón libre, por lo que con una pequeñísima proporción de él se logra aumentar mucho la cantidad de electrones libres. Tales impurezas, capaces de donar electrones, se denominan **impurezas donoras**.

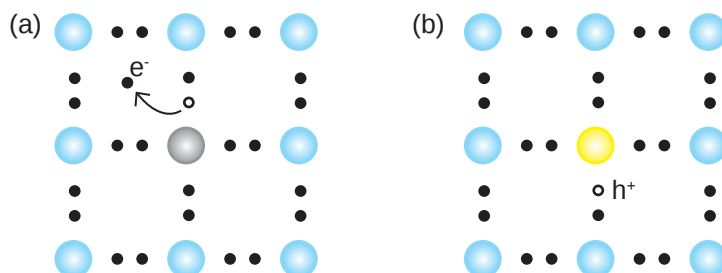
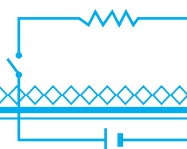


Fig. 2.27. Impurezas introducidas en un cristal de silicio: (a) cada átomo de fósforo adiciona un electrón libre. (b) cada átomo de aluminio, da lugar a un hueco.



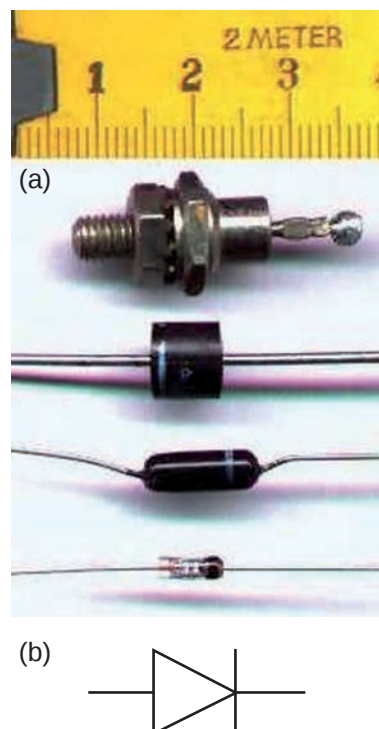
Si lo que se introduce en el cristal de silicio son átomos de un elemento con 3 electrones de valencia, como por ejemplo aluminio (Al), entonces al enlazarse con 4 átomos de silicio queda una vacancia, es decir un hueco (Fig. 2.27b). El número de huecos que surge es igual al de átomos introducidos. Estas impurezas, que originan huecos disponibles para aceptar electrones ligados durante el desplazamiento por la red de enlaces, se denominan **impurezas aceptoras**.

¿Por qué el semiconductor en que los electrones libres son muchísimos más que los huecos se denominará n y aquel en que los huecos son los mayoritarios se llamará p ?

Utilizando el tipo de impureza adecuado se preparan semiconductores en que los portadores fundamentales de carga son electrones, los cuales se denominan **semiconductores tipo n** , y semiconductores en que los portadores fundamentales son huecos, llamados **semiconductores tipo p** . En un semiconductor tipo n la corriente eléctrica se debe casi por completo a los electrones, pues la cantidad de huecos es muy pequeña comparada con la de electrones libres. En cambio, en uno tipo p sucede a la inversa, la corriente se debe básicamente a los huecos, ya que los electrones libres están en minoría.



El contacto entre un semiconductor tipo n y otro tipo p es el fundamento del **diodo semiconductor** (Fig. 2.28). Su funcionamiento, muy simplificado, consiste en lo siguiente: Si se conecta el dispositivo formado por los dos tipos de semiconductores a una fuente de corriente continua con la polaridad que se muestra en el diagrama de la figura 2.29a, denominada **polarización inversa**, aún cuando se eleve el voltaje la intensidad de corriente es extremadamente pequeña, del orden de los microamperes. Ello se debe a que con esa polaridad, los impulsados a moverse a través de la unión de los dos semiconductores y formar así la corriente eléctrica son, en el semiconductor tipo p , los electrones y en el tipo n , los huecos, pero en ambos casos su cantidad es demasiado pequeña como para originar una corriente apreciable. Sin embargo, si la polaridad del dispositivo es la mostrada en la figura 2.29b, denominada **polarización directa**, entonces los impulsados a atravesar la unión son los electrones del semiconductor tipo n , que



2.28. (a) Algunos tipos de diodos semiconductores. (b) Símbolo utilizado para un diodo común.



están en abundancia, y los huecos del semiconductor tipo p , que igualmente son abundantes, por lo que la intensidad de corriente puede llegar a ser notable. En la figura 2.30 se muestra la forma que tiene el gráfico de la característica voltampérica de un diodo común.

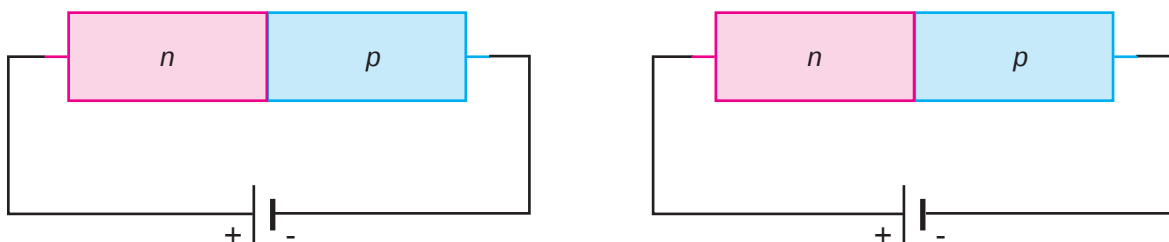


Fig. 2.29. Dispositivo formado por dos semiconductores, uno n y otro p en contacto. En (a) el dispositivo apenas conduce, pues los portadores de carga impulsados por la fuente son pocos. En (b) el dispositivo conduce, porque los portadores impulsados por la fuente están en abundancia.

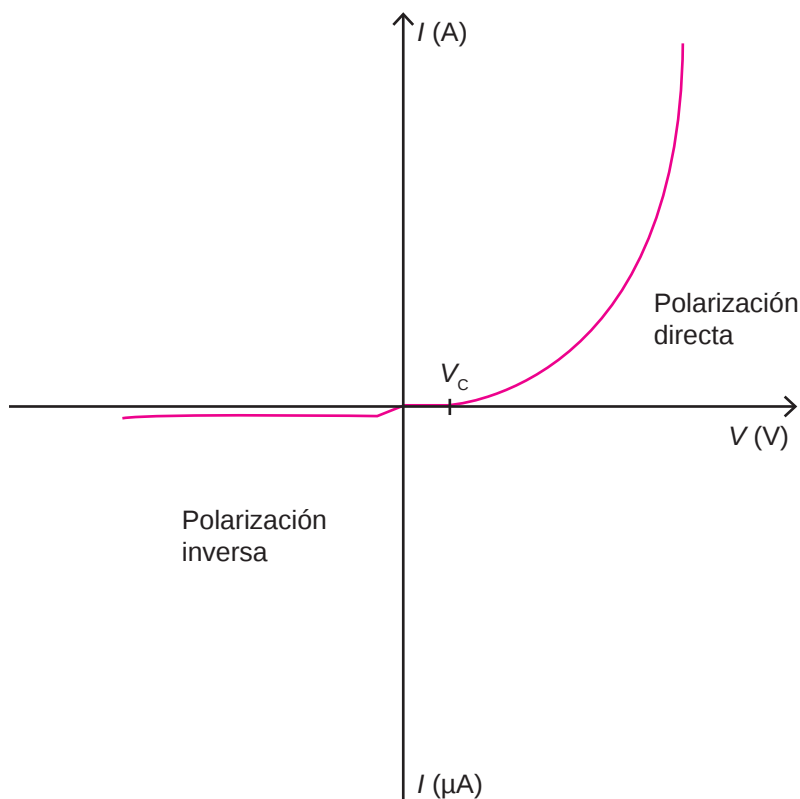


Fig. 2.30. Gráfico de la característica voltampérica de un diodo común. Cuando la polarización es inversa el diodo apenas conduce y cuando es directa, la intensidad de corriente aumenta rápidamente a partir de cierto valor de voltaje, denominado voltaje de corte (V_c).

Cabe señalar que aún cuando la polarización del dispositivo sea directa (Fig. 2.29b), si el voltaje aplicado es bajo la intensidad de corriente es muy pequeña, del orden de los nanoamperes, como muestra el gráfico de la figura 2.30. Esto se debe a lo que ocurre en el contacto entre las porciones n y p cuando se elabora el dispositivo. Durante la formación del contacto, del semiconductor tipo n penetra cierta cantidad de electrones en el tipo p y, a su vez, de este penetra cierta cantidad de huecos en el tipo n . Ocurre una **difusión**, como al poner en contacto dos gases diferentes, en que las moléculas de uno se mezclan con las del otro (aunque en la figura se ha representado muy ampliada, la zona de interpenetración es sumamente estrecha, del orden de 10^{-3} mm). Si tienes en cuenta que **antes del contacto los semiconductores eran neutros**, entonces comprenderás que la zona del semiconductor tipo p próxima a la unión queda cargada negativamente y la del semiconductor tipo n , positivamente (Fig. 2.31). Esto origina un campo eléctrico y una diferencia de potencial que en un diodo habitual de silicio es alrededor de 0.6 V y en uno de germanio 0.2 V. Nota que la intensidad de ese campo eléctrico tiene sentido opuesto a la del campo producido por la fuente cuando la polarización es directa. Por eso, la intensidad de corriente comienza a aumentar rápidamente con el voltaje aplicado (aproximadamente en forma exponencial), sólo cuando este supera los valores mencionados, según se trate de un diodo de silicio o de germanio. Tales valores se denominan **voltajes de corte**.

Esta propiedad de los diodos de conducir cuando su polaridad es directa y no conducir cuando es inversa, permite utilizarlos para convertir corriente alterna en directa, cosa necesaria cuando se conectan ciertos equipos a un enchufe habitual. Los dispositivos o circuitos que realizan esta función se denominan **rectificadores**.

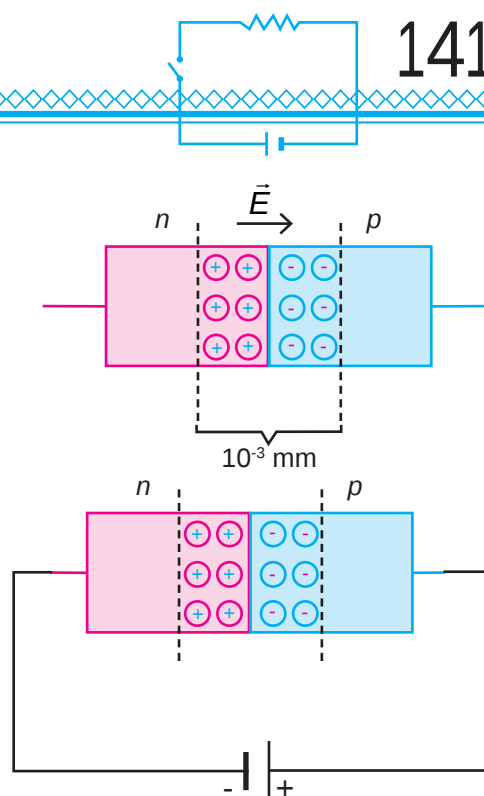
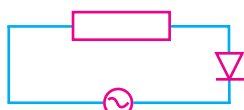


Fig. 2.31. Durante la formación del contacto entre dos semiconductores, uno tipo n y otro tipo p , ocurre una difusión de electrones y huecos. La zona de la parte p próxima a la unión queda cargada negativamente y la de la parte n , positivamente. Esto origina un campo que es opuesto al producido por la fuente cuando la polarización del diodo es directa.

¿Te atreves a dibujar la forma que tendría el gráfico de $I(V)$ en el circuito del esquema?



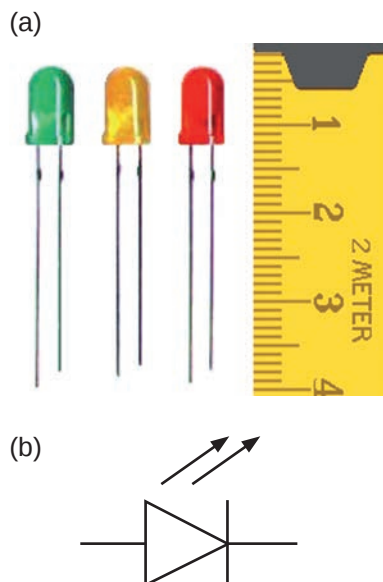


Fig. 2.32. (a) Algunos tipos de diodos emisores de luz (LED) (b) Símbolo utilizado para el LED.

Los diodos tienen otras muchas aplicaciones en los circuitos electrónicos y se ha diseñado una gran variedad de ellos. Uno de los tipos más conocido es el LED (**light emitting diode**, es decir, diodo emisor de luz) (Fig. 2.32). Hemos visto que cuando se comunica energía térmica o luminosa a un semiconductor, pueden romperse los enlaces entre sus átomos, formándose electrones libres y huecos. En el LED ocurre el proceso contrario, al combinarse electrones libres y huecos el dispositivo entrega energía en forma de radiación. En los diodos comunes también tiene lugar esta combinación de electrones y huecos, pero la mayor parte de la energía liberada se transforma en energía térmica. La transformación de energía liberada durante la combinación de electrones y huecos en energía térmica o en radiación luminosa, depende principalmente del material semiconductor utilizado. Por otra parte, los LEDs tienen una disposición constructiva especial, a fin de evitar que la radiación emitida sea absorbida nuevamente por el material circundante.

Como los diodos comunes, para que el LED conduzca es necesario que su polaridad sea directa. Habitualmente su terminal más largo indica que ese debe ser el positivo (Fig. 2.32). La intensidad de corriente de trabajo de los LEDs comunes está entre 10 mA y 20 mA. El **voltaje de corte**, es decir, a partir del cual la intensidad de corriente es considerable y comienzan a emitir apreciablemente, varía entre 1.8 V y 3.5 V, según el color. El menor valor corresponde al rojo y el mayor al azul. También hay LEDs que emiten radiación infrarroja y ultravioleta.

Con ayuda de Internet profundiza en los tipos y aplicaciones de los diodos.



La unión de dos materiales semiconductores de diferente tipo constituye el fundamento no solo de los diodos, sino también de otros dispositivos electrónicos y, en particular, del **transistor**, cuya invención significó una gran revolución en la electrónica. Los transistores son parte esencial de los circuitos de radios, televisores, computadoras, etc.

Indaga, en una enciclopedia o en Internet, acerca de los transistores.

2.3. Funcionamiento de circuitos eléctricos simples.

2.3.1. Conexiones en serie y paralelo.

Dos de las formas más elementales de conectar los dispositivos en un circuito son las mostradas en la figura 2.33.

En el primer tipo de conexión (Fig. 2.33a), denominado **en serie**, la **intensidad de corriente es la misma en todos los dispositivos** y la **diferencia de potencial en los extremos del circuito es igual a la suma de las diferencias de potencial entre ellos**.

En el segundo tipo de conexión (Fig. 2.33b), llamado **en paralelo**, la **diferencia de potencial es la misma en los terminales de todos los dispositivos** y la **intensidad de corriente en la parte no ramificada del circuito es igual a la suma de las intensidades en cada uno de ellos**.

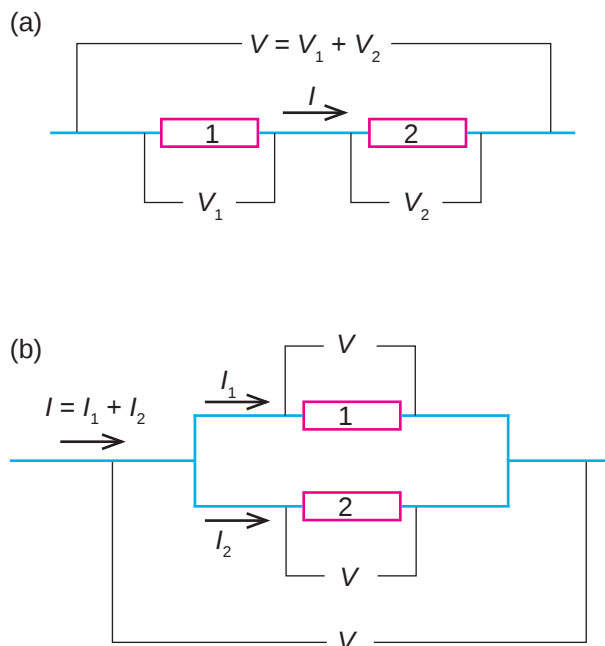


Fig. 2.33. Dos de las formas más elementales de conectar los dispositivos en un circuito: (a) conexión en serie, (b) conexión en paralelo.

Cuando los receptores están **en serie**, si se desconecta alguno de ellos se interrumpe el paso de la corriente en todos los demás. Cuando están **en paralelo**, si se desconecta alguno, por los otros puede continuar fluyendo la corriente.

En la conexión en paralelo, ¿tienen realmente los receptores que situarse uno paralelamente al otro?

El circuito eléctrico de las viviendas y otras instalaciones se dispone de tal modo que cuando se conecten varios receptores, queden en paralelo. ¿Qué ventajas representa este tipo de conexión respecto a la conexión en serie?

Menciona y argumenta qué tipo de conexión es la utilizada en los siguientes casos: a) en una "extensión" diseñada para conectar varios equipos, b) entre una lámpara y su interruptor, c) entre las pilas en una linterna, d) entre los bombillos de una guirnalda de las utilizadas en Navidad. Traza esquemas de los circuitos en cada caso.





Imaginemos que en la figura 2.33 los dispositivos conectados en serie (Fig. 2.33a) o en paralelo (Fig. 2.33b) son dos receptores de resistencias R_1 y R_2 . Los receptores pueden ser, por ejemplo, bombillos, calefactores u hornillas eléctricas, motores eléctricos. ¿Cuál será la resistencia total de las porciones de circuito en cada caso?

Para la **conexión en serie** (Fig. 2.33a) se tiene:

$$V = V_1 + V_2$$

Dividiendo esta ecuación entre la intensidad de corriente I en el circuito se tiene:

$$\frac{V}{I} = \frac{V_1}{I} + \frac{V_2}{I}$$

Pero, como recordarás, la definición de resistencia eléctrica es $R = V/I$, por lo que la **resistencia total o equivalente de una porción de circuito con dos receptores conectados en serie es igual a la suma de sus resistencias**:

$$R = R_1 + R_2$$

En el caso de la **conexión en paralelo** (Fig. 2.33b):

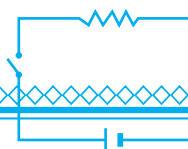
$$I = I_1 + I_2$$

El voltaje V entre los extremos de la porción de circuito constituida por los dos receptores es el mismo que entre los terminales de cada uno de ellos. Dividiendo la ecuación anterior entre dicho voltaje se tiene:

$$\frac{I}{V} = \frac{I_1}{V} + \frac{I_2}{V}$$

Y como $R = V/I$, entonces $1/R = I/V$, por lo que la ecuación anterior puede escribirse:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$



De aquí que el inverso de la resistencia total o equivalente de una porción de circuito con dos receptores conectados en paralelo es igual a la suma de los inversos de sus resistencias:

De la ecuación anterior puede hallarse R :

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

Los amperímetros se conectan en serie en la parte del circuito cuya intensidad de corriente se desea medir (Fig. 2.34a). Tienen una resistencia eléctrica muy pequeña, pues de lo contrario, al conectarlos modificarían apreciablemente la corriente que se desea medir. Es necesario tener presente siempre esa baja resistencia que poseen y no intentar, por ejemplo, medir la intensidad de corriente en una batería o en un enchufe conectando el amperímetro directamente a ellos. Esto provocaría un **cortocircuito**. Al ser muy pequeña la resistencia, según la ecuación $I = V/R$, la intensidad sería muy elevada, lo que echaría a perder el amperímetro. **Los voltímetros se conectan en paralelo** a la porción de circuito cuya diferencia de potencial se pretende medir (Fig. 2.34). Para que no produzcan alteraciones significativas en la corriente del circuito, y por tanto tampoco en el voltaje que se pretende medir, se construyen con una resistencia elevada. Esta debe ser mucho mayor que la resistencia de la porción de circuito a la cual se conectan. El voltímetro sí puede conectarse directamente a una batería o a un enchufe sin riesgo de que se eche a perder, solo hay que tener cuidado que esté previsto para medir el voltaje dado.

Hasta ahora no hemos tenido en cuenta la resistencia de las fuentes de fem, sin embargo, como dijimos en el apartado 2.1.4.4, en el interior de ellas las partículas cargadas se desplazan contra la resistencia que les presentan los átomos o moléculas entre los que se mueven. La resistencia eléctrica de las fuentes comúnmente se denomina **resistencia interna** y se designa por la letra r , para diferenciarla de la resistencia externa R del circuito. En las baterías y pilas electroquímicas la resistencia interna es

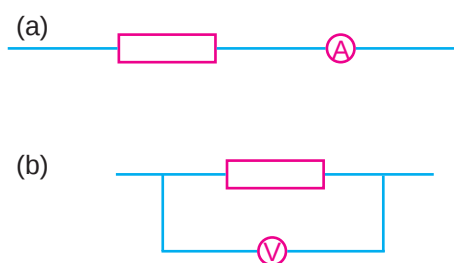


Fig. 2.34. (a) Los amperímetros se conectan en serie con la parte del circuito cuya intensidad de corriente se desea medir. (b) Los voltímetros se conectan en paralelo.

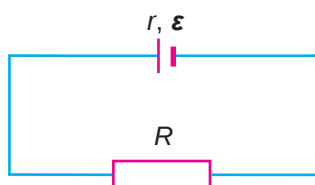


Fig. 2.35. Al conectar una fuente y un receptor, quedan en serie y la resistencia total del circuito es la suma de la resistencia de ambos: $r + R$.

la del electrolito y los electrodos, y en los generadores electromagnéticos, la del enrollado de sus bobinas.

Cuando una fuente se conecta a un circuito (Fig. 2.35), queda en serie con él, por lo que la resistencia total del circuito es la suma de la resistencia de la fuente y la resistencia externa: $r + R$. La resistencia externa R puede deberse a un solo dispositivo, pero también a un conjunto de ellos. Si la fuente es una pila, o una batería, y es nueva, o no se ha usado mucho, su resistencia interna es muy pequeña comparada con la externa y puede despreciarse. Sin embargo, con el uso aumenta y es necesario tomarla en cuenta, pues afecta a la intensidad de corriente.

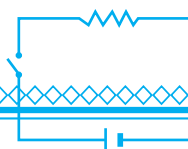
Como ya sabes, la fem expresa la energía (interna, luminosa, mecánica).. que se transforma por unidad de carga acumulada en los terminales de la fuente. Cuando por el circuito pasa corriente, una parte de esa energía pasa a energía potencial eléctrica en los terminales de la fuente, originando la diferencia de potencial entre ellos, pero otra parte se transforma en energía térmica en el interior de la fuente. Como resultado de esto, la energía potencial por unidad de carga originada por la acumulación de carga en los terminales de la fuente, es decir, la diferencia de potencial entre dichos terminales, $V = IR$, es menor que la fem:

$$IR = \varepsilon - Ir$$

El producto Ir representa la energía por unidad de carga que no se transforma en energía eléctrica, sino en térmica, debido a la resistencia que presenta la fuente al paso de la corriente. La ecuación anterior puede escribirse:

$$\varepsilon = IR + Ir$$

El producto de la intensidad de corriente por la resistencia de una parte del circuito, con frecuencia se denomina **caída de voltaje**. Por eso, según la ecuación anterior, **la fem es igual a la suma de las caídas de voltaje en la parte externa del circuito y en el interior de la fuente**.



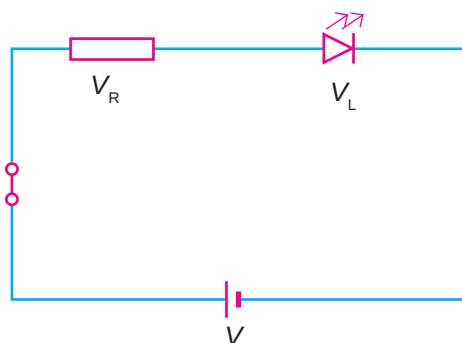
Si escribimos la ecuación en la forma $\varepsilon = I(R + r)$, se hace evidente porqué al conectar solo un voltímetro a los terminales de la fuente este mide la fem ε : como el voltímetro posee una resistencia muy elevada, $r \ll R$ y, por tanto, $\varepsilon \approx IR$. Es decir, la fem es aproximadamente igual a la diferencia de potencial en el voltímetro. Sin embargo, si la fuente está conectada a algún receptor de pequeña resistencia eléctrica, entonces su resistencia interna no puede despreciarse y en este caso el voltímetro indicará el valor del producto IR , que es menor que la fem de la fuente.

Despejando I la ecuación también puede escribirse:

$$I = \frac{\varepsilon}{r + R}$$

Esta expresión a veces se denomina **ley de Ohm para el circuito completo** (incluye la parte externa del circuito y la interna de la fuente). Si $r \ll R$, entonces en lugar de $r + R$ puede simplemente escribirse R y en lugar de ε , V , con lo cual se obtiene como caso particular la ecuación $I = V/R$, que es la forma común de la ley de Ohm.

Ejemplo 2.8. Se sabe que cuando el voltaje aplicado a un LED rojo es 1.8 V su luminosidad es baja y cuando es de 2.2 V alta. En el primer caso la intensidad de corriente es de unos 10 mA y en el segundo alrededor de 20 mA. Si el LED se va conectar a una fuente cuya fem es 5.0 V, ¿qué resistencia debe colocarse en serie con él para tener: a) 10 mA y, por tanto, baja luminosidad, b) 20 mA y por tanto, alta luminosidad. Desprecia la resistencia interna de la fuente.



En la figura se ha representado el diagrama del circuito. Puesto que la resistencia interna de la fuente se desprecia, el voltaje entre los extremos del conjunto coincide con su fem, es decir, es 5.0 V. Por otra parte, dicho voltaje es igual a la suma de los voltajes en el LED y en el resistor:

$$V = V_L + V_R$$

$$R = \frac{V}{I} - \frac{V_L}{I} = \frac{V - V_L}{I}$$



a) Sustituyendo ahora en la ecuación anterior los datos para baja luminosidad:

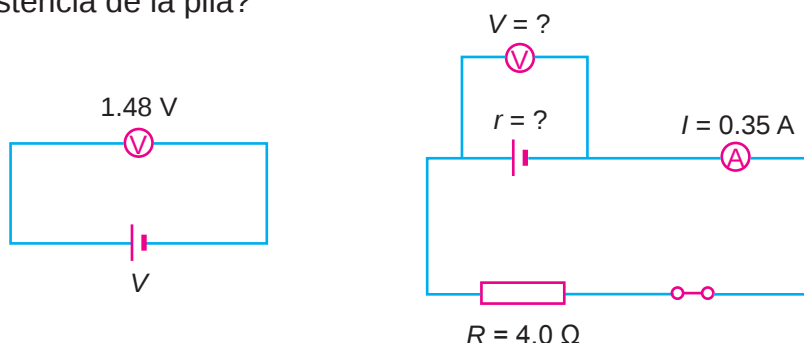
$$R = \frac{V - V_L}{I} = \frac{5 \text{ V} - 1.8 \text{ V}}{10 \times 10^{-3} \text{ A}} = 320 \, \Omega$$

b) En el caso de alta luminosidad:

$$R = \frac{V - V_L}{I} = \frac{5 \text{ V} - 2.2 \text{ V}}{20 \times 10^{-3} \text{ A}} = 140 \, \Omega$$

Ejemplo 2.9. Mediante un voltímetro se encontró que el voltaje entre los bornes de una pila es 1.48 V. Después se conectó en serie con ella un resistor de 4.0 Ω y un amperímetro, el cual indicó 0.35 A. a) Dibuja un esquema de los circuitos. b) ¿Cuál es la resistencia interna de la pila? c) ¿Qué voltaje indica el voltímetro cuando la pila está conectada al resistor y al amperímetro? d) ¿Cuál es la caída de voltaje debida a la resistencia de la pila?

(a)



b) Ya sabes que al conectar la pila como en el primer diagrama, el voltímetro indica su fem ε . La intensidad de corriente en el circuito representado por el segundo diagrama es $I = \varepsilon / (r + R)$. En esta ecuación R representa la resistencia externa total, que en este caso está formada por la suma de las resistencias del resistor y del amperímetro. Sin embargo, supondremos que la de este último es pequeña en comparación con la del resistor y no la tendremos en cuenta. De modo que ε , R e I son conocidas y el valor de r es el que debemos hallar.

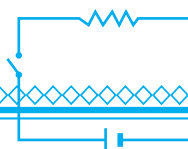
Resolviendo la ecuación para r :

$$(r + R)I = \varepsilon$$

$$r + R = \frac{\varepsilon}{I}$$

De donde:

$$r = \frac{\varepsilon}{I} - R = \frac{1.48 \text{ V}}{0.35 \text{ A}} - 4.0 \, \Omega = 0.23 \, \Omega$$



c) En el circuito del segundo diagrama, el voltímetro indicará la suma de las caídas de voltaje en el resistor y en el amperímetro conectado en serie con él, pero hemos supuesto que la resistencia del amperímetro es despreciable, por lo que no la tenemos en cuenta. De modo que la indicación del voltímetro vendrá dada por la caída de potencial en el receptor:

$$V_v = RI = (4.0 \, \Omega)(0.35 \, \text{A}) = 1.4 \, \text{V}$$

Nota que el valor obtenido es menor que la fem. Ello se debe a que en el interior de la pila hay cierta caída de voltaje debida a su resistencia interna.

d) la caída de voltaje en el interior de la pila es:

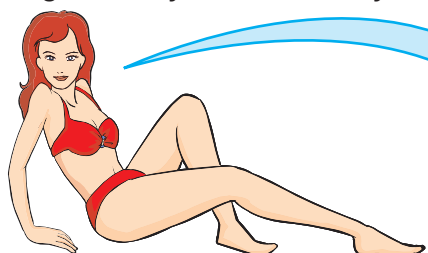
$$V_r = rI = (0.229 \, \Omega)(0.35 \, \text{A}) = 0.080 \, \text{V}$$

Esta caída de voltaje representa la energía por unidad de carga que no se transforma en energía eléctrica, sino en térmica, originando una elevación de temperatura de la pila.

2.3.2. Dispositivos de control.

Durante la utilización de la energía eléctrica es importante no solo conectar adecuadamente los dispositivos, sino también utilizar ciertos **dispositivos de control**. Entre los más simples y comunes están, además de los **interruptores**, los **fusibles**, los **potenciómetros** y **reóstatos**, y los **termostatos**.

Los **fusibles** (Fig. 2.36) aseguran que la intensidad de corriente no sobrepase determinado valor. Los más comunes constan de un conductor, frecuentemente de plomo y con forma de filamento o lámina, por el cual fluye la corriente. Si la intensidad de ésta se eleva excesivamente, entonces el conductor al calentarse se funde, interrumpiéndose la corriente. Para resguardarse de intensidades de corriente mayores que las aceptables, en la actualidad se emplean, junto a los tradicionales fusibles, “breakers”, interruptores magnéticos y electrónicos y otros dispositivos.



¿Cómo debe ir conectado el fusible que protege a cierto equipo, en serie o en paralelo con él? Argumenta.

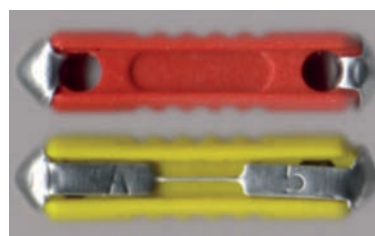


Fig. 2.36. fusibles comunes.



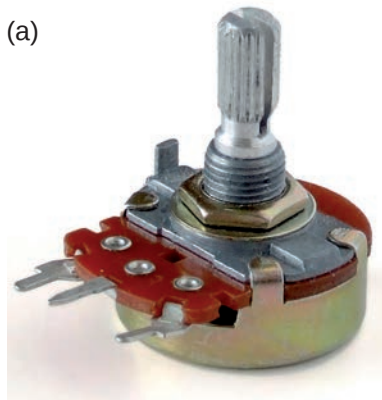
Profundiza en una enciclopedia, o Internet, acerca de los fusibles.



En los últimos años se han diseñado “fusibles” especiales a fin de proteger a las personas de descargas eléctricas producidas por corrientes de fuga en ciertos equipos, en particular cuando son utilizados en lugares húmedos. Tales dispositivos se colocan en los enchufes de cocinas, baños y otras áreas que pueden resultar especialmente peligrosas. Ellos detectan un desbalance entre la intensidad de corriente en el “vivo” y en el “neutro” de la red. Puesto que este desbalance puede deberse a una fuga de corriente a través de la persona, cuando sobrepasa los 5 mA, el dispositivo interrumpe la corriente.

Los **potenciómetros** son resistores, generalmente constituidos por un conductor de gran resistividad eléctrica ρ , con tres terminales (Fig. 2.37), dos en los extremos y uno intermedio, que puede variar su contacto a través del resistor mediante rotación o deslizamiento en línea recta. Se emplean para aplicar a un circuito una parte de cierto voltaje. En la figura 2.38 se muestra un esquema que permite comprender esta función del potenciómetro. Observa que si el contacto deslizante, representado en el diagrama por la saeta, se desliza hasta el extremo izquierdo del resistor, entonces el voltaje en el bombillo será nulo. Por el contrario, si el contacto deslizante se moviera hasta al extremo derecho, el voltaje en sus terminales sería 12 V. Si el contacto deslizante está en un lugar intermedio, “divide” el voltaje de 12 V en dos partes, una corresponde a su parte izquierda y otra a su parte derecha, por eso cuando el potenciómetro se conecta como en el diagrama de la figura, se dice que actúa como **divisor de voltaje**.

(a)



(b)

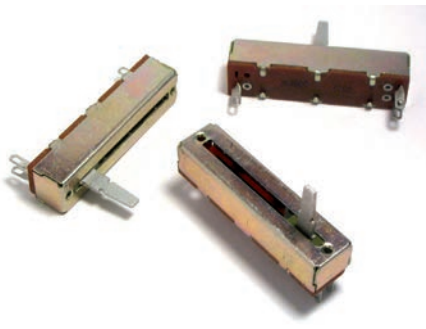


Fig. 2.37. Los potenciómetros son resistores con tres terminales, uno de ellos intermedio que puede variar su contacto con el resistor, mediante rotación (a) o desplazamiento en línea recta (b). Se utilizan, por ejemplo, para controlar volumen y otras características del sonido en equipos de audio.

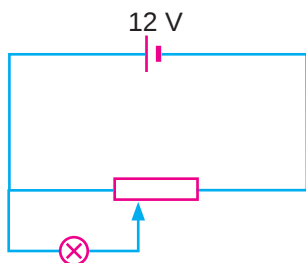


Fig. 2.38. El potenciómetro se utiliza para aplicar a un dispositivo o circuito una parte de cierto voltaje, es decir, como divisor de voltaje.

Explica con tus propias palabras por qué cuando el potenciómetro se conecta como en el diagrama de la figura 2.38 se dice que actúa como divisor de voltaje.



Si en un potenciómetro solo se conectan el terminal del contacto deslizante y el de uno de los extremos, entonces actúa como resistor variable o **reóstato**.

En el ejemplo 2.8 vimos que si se utiliza una fuente de 5 V para alimentar un LED, éste da baja luminosidad cuando se conecta en serie con un resistor de unos $320\ \Omega$ y alta si el resistor es de alrededor de $140\ \Omega$. Sin embargo, la intensidad de corriente que pasa por el LED y, por tanto, su luminosidad, puede ser ajustada al valor deseado utilizando un potenciómetro en calidad de reóstato. En la figura 2.39 se muestra el esquema del circuito.

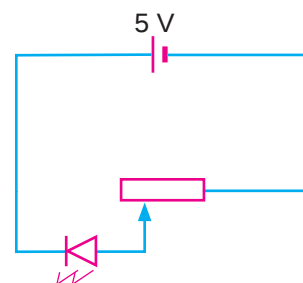
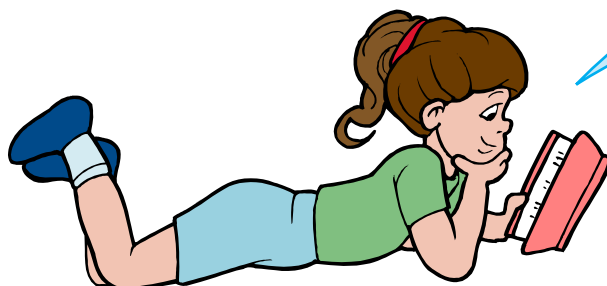


Fig. 2.39. Potenciómetro utilizado como reóstato para regular la intensidad de corriente en un LED y, por tanto, su luminosidad.

Los **termostatos**, comunes en planchas, refrigeradores y acondicionadores de aire, posibilitan un nivel superior de control en los circuitos: la **regulación automática**. La función de los termostatos es mantener la temperatura cercana a cierto valor. Por ejemplo, en una plancha, cuando la temperatura alcanza determinado valor, el termostato desconecta la “entrada” de energía eléctrica y luego, al descender la temperatura hasta cierto nivel, la conecta nuevamente.



Indaga en una enciclopedia, o en Internet, acerca del funcionamiento de los termostatos.

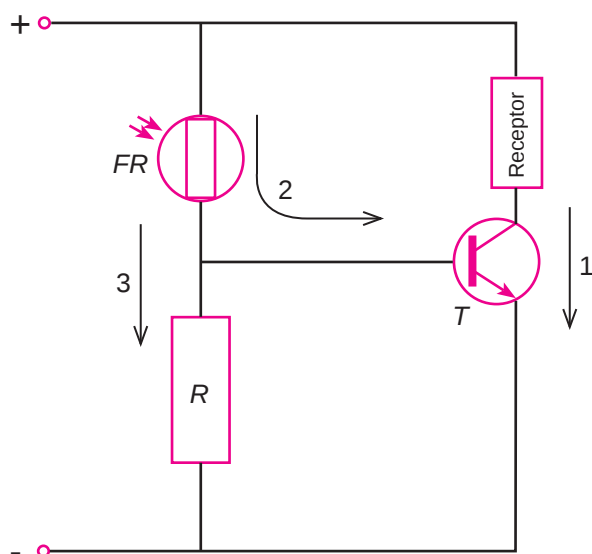


Fig. 2.40. El circuito representado puede considerarse formado por tres circuitos simples acoplados entre sí. Los cambios en uno afectan la intensidad de corriente en los otros.

Imagina que en el circuito de la figura 2.40 el receptor es un pequeño bombillo, ¿dónde habría que colocar R y FR para que al disminuir la intensidad de luz que incide sobre el fotorresistor el bombillo se encienda?



2.3.3. Acoplamiento de circuitos eléctricos simples.

En la figura 2.40 se muestra el esquema de un circuito algo más complejo que los examinados hasta ahora. Consta de una **fuentes**, algún **receptor**, **conductores de conexión** y un **dispositivo o sistema de control** formado por un resistor (R), un fotorresistor (FR) y un transistor (T). En este circuito los componentes no están conectados en serie ni en paralelo, está formado por tres circuitos más simples **acoplados entre sí**. Los cambios en uno de ellos afectan a los otros. Los transistores tienen la peculiaridad de que posibilitan regular la corriente en uno de los circuitos (1) a partir de la diferencia de potencial entre su base (en la figura su terminal intermedio) y el emisor (en la figura su terminal inferior). En particular, por el circuito 1 puede fluir una corriente apreciable solo si dicha diferencia de potencial es superior al voltaje de corte (0.6 V).

Observa que el fotorresistor y el resistor forman un divisor de voltaje. Si la resistencia del resistor es pequeña comparada con la del fotorresistor, entonces la diferencia de potencial en él, y por tanto entre la base y el emisor del transistor también es pequeña, menor que el voltaje de corte, y el transistor no deja pasar corriente por el circuito 1. Sin embargo, si la intensidad de luz que incide sobre el fotorresistor aumenta, su resistencia disminuye y la caída de voltaje en el resistor se hace mayor, con lo cual el transistor pudiera dejar pasar corriente por el circuito 1. El transistor funciona así como un interruptor. En conclusión, un aumento de la intensidad de luz en el fotorresistor, puede hacer funcionar el receptor (timbre, motor, etc.). En lugar del fotorresistor es posible utilizar otro dispositivo cuya resistencia varíe al aumentar o disminuir otra magnitud, digamos una termorresistencia, la cual disminuye su resistencia con el aumento de temperatura. De este modo un circuito como el de la figura 2.40 puede detectar cierto nivel de iluminación, temperatura, etc.

A lo largo de este apartado hemos visto que los circuitos eléctricos pueden ser muy variados, tanto por sus componentes como por el modo en que estos se conectan entre sí. En particular, como fuentes se utilizan pilas, acumuladores, el enchufe de la red eléctrica, etc. La relación de receptores eléctricos es inmensa: lámparas, motores, televisores y muchos más. Los dispositivos y sistemas de control también son muy variados. Todos estos elementos se asocian en los circuitos de muy diferentes modos: en serie, en paralelo, o en formas mucho más complejas. Sin embargo, pese a esta diversidad de circuitos, entre ellos existe cierta unidad: el funcionamiento básico de todos ellos puede ser descrito utilizando los conceptos de fem, voltaje, intensidad de corriente y potencia.

2.3.4. Medición y ahorro de energía eléctrica.

Para el uso racional de la energía eléctrica y su **ahorro**, resulta indispensable su **medición**, tanto durante el “consumo” como durante la “generación”.

En el curso de Mecánica te relacionaste con la unidad fundamental de energía, el **joule**. Sin embargo, al referirse a la cantidad de energía “consumida” o “generada” por receptores y fuentes conectados a la red habitual de electricidad, es usual emplear otra unidad con la que resulta más cómodo trabajar: el **watt.hora** (W.h). Esta unidad tiene la ventaja que permite relacionar fácilmente la cantidad de energía utilizada por el equipo o instalación, con su potencia y el tiempo de funcionamiento. Por ejemplo, la energía consumida al cabo de una hora por una lámpara de 20 W es, simplemente, $20 \text{ W} \times 1 \text{ h} = 20 \text{ W.h}$, y la generada en un día por una planta de 100 MW, es $100 \text{ MW} \times 24 \text{ h} = 2\,400 \text{ MW.h}$.

¿Por qué será que en el texto, al referirse a la energía eléctrica consumida o generada se escribieron esas palabras entre comillas?

Un bombillo de 100 W permanece encendido todos los días durante 10 horas. ¿Qué cantidad de energía eléctrica, expresada **W**, “consume” cada día?





Si la resistencia del aire fuese despreciable, ¿hasta qué altura se elevaría un cuerpo de 10 kg lanzado verticalmente hacia arriba con una energía de 1 W.h? ¿Y si fuese lanzado con la energía equivalente a la que consume un bombillo de 100 W en una hora?



¿Qué relación hay entre el **watt.hora** (W.h) y la unidad fundamental de energía, es decir, el **joule** (J)?

Puesto que $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$, resulta que:

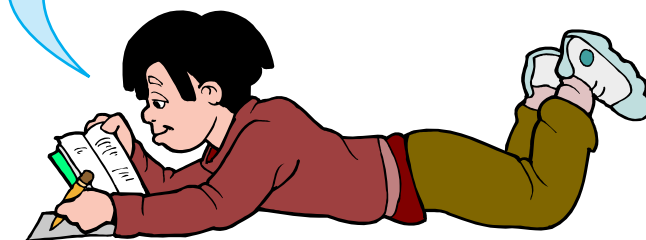
$$1 \text{ W.h} = 1 \text{ J/s} \times 3\,600 \text{ s} = 3\,600 \text{ J}.$$

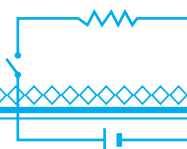
La Comisión Federal de Electricidad mide la energía consumida en las viviendas y otras instalaciones mediante un instrumento denominado **medidor de consumo eléctrico**, o **contador eléctrico**. Los hay electromecánicos y electrónicos. La idea básica del funcionamiento de los electromecánicos (Fig. 2.41), que siguen siendo los más comunes, consiste en lo siguiente. Constan de un disco metálico que gira con una rapidez proporcional a la intensidad de corriente que pasa por el instrumento, la que a su vez es proporcional a la potencia de los equipos que están conectados ($I = P/V$). En consecuencia, el número de vueltas realizado por el disco al cabo de cierto tiempo depende de la **potencia** total de los equipos en uso y del **tiempo de funcionamiento**. Pero estas magnitudes, potencia y tiempo, determinan, como sabes, la energía consumida. Por consiguiente, contando el número de vueltas que ha dado el disco del medidor, es posible conocer la energía consumida. Esto es precisamente lo que hace el medidor. El equivalente en **W.h** del número de vueltas que ha dado el disco es leído en los pequeños relojitos.



Fig. 2.41. Medidor de consumo eléctrico electromecánico.

Observa en el medidor eléctrico de tu casa cómo depende la rapidez con que gira su disco de la cantidad de equipos eléctricos que están conectados. Verifica si la instalación eléctrica de tu casa funciona correctamente: desconecta todos los equipos y mira si el disco gira.



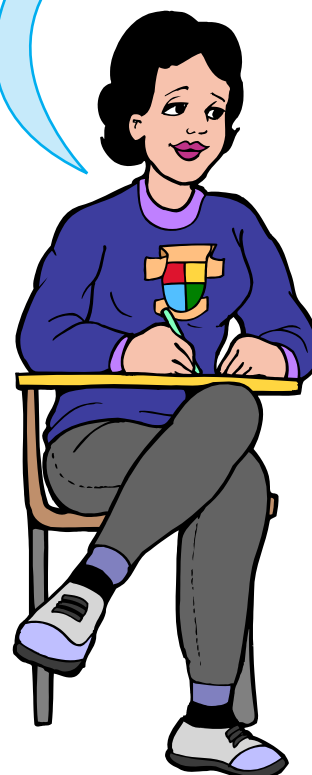


A finales del pasado siglo, la generación y consumo mundial de energía era unas 80 veces superior que en 1800, año en que se inventó la primera fuente de electricidad efectiva. Buena parte de ese crecimiento se ha debido a la energía eléctrica que se genera en termoeléctricas a partir de **combustibles fósiles**. El agotamiento de estos, como sabes, se prevé para un futuro no lejano, lo que ha traído consigo un encarecimiento de la producción de energía eléctrica en el mundo.

Lo anterior, unido a la contaminación del medio ambiente provocada por las termoeléctricas habituales, ha conducido a la urgente necesidad de **ahorrar** energía eléctrica, y a la búsqueda de fuentes que constituyan una alternativa a los combustibles fósiles.

¿Si cada kilowatt.hora (kW.h) vale \$ 0.95. ¿cuál será al cabo de un mes el costo debido a un bombillo de 100 W que permanece encendido 10 horas diarias?

Indaga en Internet qué proporción de la energía total que se consume en el planeta es eléctrica. ¿Cuáles son las fuentes principales de las que se obtiene en la actualidad?





2.4. Actividades de sistematización y consolidación.

2.4.1. Sopa de letras.

Ú T G O I R E P M A E G L J T A G F
L S G M V E U Q F T F F O U C N O E
X Í B Y C V L B Y F O Z X H I R N L
E C V Ó O Á H E E X T Í D N A E O B
L P A Ú N Á I U C M O I T É N T D I
E O I T D O Ó E C T R E V Ü I L O S
C C G H U D N Ó D E R Ú Q U Q A R U
T I R U C O M L C R E Ó C K U Z T F
R R Á E T I D T U W S R N B T I C Y
O T B C O D A P B B I S O E Q É E W
L C A O R M T K Í C S T I V Ü P L T
I É T D S O H D L L T Ú Á X Y Ú E T
S L E S R S Ñ E F H O Y D D Y F Á Q
I E R I Í Q F N S T R U J V L U C Ü
S I Í G C O R R I E N T E C G E O Á
N D A Y I U S Í K A D L É L W N Q B
Ú G H P D F E M É M R K Ú Á E T Ñ Ñ
G Q X O R T E M Í R E P M A F E Ú A

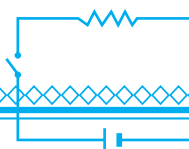
O A G Ñ É G R K B Z Q D T R P Í R Í
Í I R O T S I M R E T U O Ü R W E A
D D T L A T E M O R G T V O O R S J
Q J E L T F Ú T E F S Í T S T E I Y
A L I P O N Q Ó Y I J A Í A S S S N
H R C E É V S X S P T H Z N I I T A
R E E B C T Z N F S Ñ W D B S S E Á
N Í F C A A A Ü O K I Q K Q E T N F
N C Ó T E R Í M Q O Z H R M R I C Ó
É A O I T P R M R U K T U Ñ R V I E
Á Q Y L Í E T T P U T L Y K O I A J
X U D E T A E O J U T X E F M D J A
I J E T Ú M T H R Í T O M H R A K T
F Z L H Í E I C M I T I K É E D U L
B Ó T T N V H E Z Q F M A T T Á E O
R Ü L C P O T E N C I Ó M E T R O V
B O I T G R C T E Z Q H E F A A X G
V A B R O T C U D N O C I M E S W J

Alterna
Amperímetro
Amperio
Batería
Circuito
Conductor
Corriente
Dieléctrico
Diodo
Directa
Electrodo
Electrolisis
Electrón
Fem
Fotorresistor
Fuente
Fusible
Hueco
Interrupor
Ión

LED
Metal
Multímetro
Ohm
Pila
Potencia
Potenciómetro
Receptor
Reóstato
Resistencia
Resistividad
Semiconductor
Termistor
Termorresistor
Termostato
Transistor
Voltaje
Voltímetro
Voltio
Watt

Escribe cada palabra en Wik pedia o en Encarta y da un vistazo a lo que encuentres.





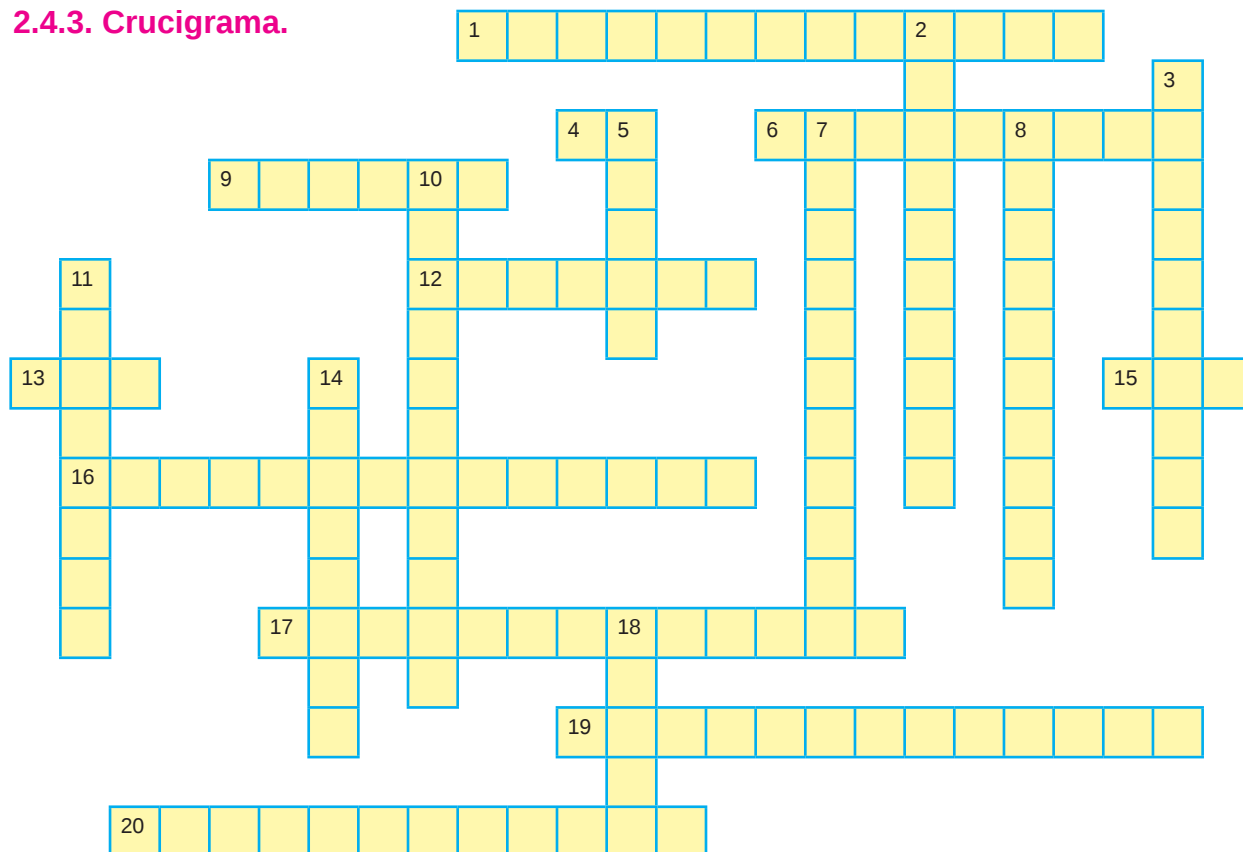
2.4.2. Conexión de conceptos e ideas.

Relaciona las dos columnas escribiendo el número según corresponda.

- | | |
|--|---------------------------------------|
| 1. Movimiento de partículas cargadas en determinada dirección. | () Alessandro Volta |
| 2. Una de las condiciones que se requiere para que exista corriente eléctrica. | () Campo eléctrico |
| 3. Mecanismo basado en la electrización por frotamiento que permite acumular carga en un cuerpo. | () Característica volt-ampérica |
| 4. Científico que inventó el primer generador efectivo de electricidad. | () Corriente alterna |
| 5. Cambios provocados por la corriente eléctrica. | () Corriente directa |
| 6. Científico que descubrió el efecto magnético de la corriente eléctrica. | () Corriente eléctrica |
| 7. Corriente eléctrica cuyo sentido no varía. | () Descarga eléctrica |
| 8. Corriente eléctrica que varía su sentido periódicamente. | () Divisor de voltaje |
| 9. Rapidez con que fluye carga neta a través de la sección transversal de un conductor. | () Efecto fotoeléctrico |
| 10. Rapidez con que se transforma algún tipo de energía en energía eléctrica, o esta en otros tipos de energía. | () Efectos de la corriente eléctrica |
| 11. Amplitud del voltaje alterno sinusoidal. | () Equivalente electroquímico |
| 12. Voltaje que mide un voltímetro en un enchufe habitual. | () Georg S. Ohm |
| 13. Científico que encontró la relación de proporcionalidad directa entre la intensidad de corriente y la diferencia de potencial entre los extremos de un conductor metálico. | () Hans C. Oersted |
| 14. Dependencia entre la intensidad de corriente y la diferencia de potencial para un dispositivo eléctrico. | () Intensidad de corriente eléctrica |
| 15. Científico a quien se debe el descubrimiento de que la masa de sustancia obtenida en los electrodos durante una electrólisis es proporcional a la intensidad de corriente y al tiempo. | () Máquina electrostática |
| 16. Cociente entre la masa y la carga eléctrica de un ión. | () Michael Faraday |
| 17. Denominación que también recibe la corriente eléctrica en los gases. | () n |
| 18. Fenómeno que consiste en la ruptura de los enlaces entre los átomos al incidir luz sobre un material semiconductor. | () p |
| 19. Diferencia de potencial en un diodo a partir de la cual la intensidad de corriente se hace apreciable. | () Potencia eléctrica |
| 20. Potenciómetro o resistores conectados para aplicar una parte de cierto voltaje a un circuito. | () Voltaje de corte |
| 21. Tipo de semiconductor en que los portadores fundamentales de carga son electrones y los huecos están en minoría. | () Voltaje efectivo |
| 22. Tipo de semiconductor en que los portadores fundamentales de carga son los huecos y los electrones libres están en minoría. | () Voltaje pico |



2.4.3. Crucigrama.



Horizontales

1. Dispositivo cuya resistencia eléctrica depende fuertemente de la iluminación.
4. Letras que simbolizan la unidad de energía habitualmente utilizada para medir la energía eléctrica producida o consumida.
6. Efecto de la corriente eléctrica que tiene lugar cuando un conductor con corriente actúa sobre la aguja de una brújula.
9. Se dice de la impureza que al introducirla en el semiconductor aporta electrones libres.
12. Nombre de elemento químico cuyos átomos se enlazan formando un material semiconductor.
13. Tipo de diodo semiconductor que emite luz al pasar corriente eléctrica por él.
15. Suma de las caídas de voltaje en la parte externa de un circuito y en el interior de la fuente.
16. Dispositivo cuya resistencia eléctrica depende fuertemente de la temperatura.
17. Material cuya conductividad eléctrica ocupa un lugar intermedio entre los semiconductores y los dieléctricos.
19. Resistor con tres terminales, uno de los cuales está unido a un contacto que puede deslizarse a través del resistor.

20. Dispositivo o circuito que convierte corriente alterna en directa.

Verticales

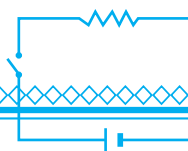
2. Forma que tiene el gráfico de voltaje en función del tiempo correspondiente a un enchufe habitual.
3. Nombre del instrumento que mide la diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito.
5. Portador de carga positiva en un material semiconductor.
7. Nombre del instrumento de medición de la intensidad de corriente.
8. Dispositivo semiconductor cuya invención representó una gran revolución en la electrónica.
10. Magnitud eléctrica que constituye una medida de la oposición que presenta un dispositivo al establecimiento de una corriente eléctrica en él.
11. Se dice de la impureza que al introducirla en el semiconductor conduce a la aparición de huecos.
14. Tipo de conexión habitualmente utilizada en los circuitos eléctricos de las viviendas.
18. Dispositivo que puede conducir corriente eléctrica cuando sus terminales tienen cierta polaridad y apenas conducir cuando la polaridad es inversa.

2.4.4. Actividades de repaso.

1. Comenzando con el término “Corriente eléctrica”, confecciona un diagrama que conecte conceptos e ideas como los siguientes: portadores de carga, campo eléctrico, efectos de la corriente, corriente directa, corriente alterna.
2. Intenta responder, resumidamente, las siguientes preguntas formuladas al inicio de la unidad: ¿En qué consiste la corriente eléctrica? ¿Cuáles son las condiciones que se requieren para que exista? ¿Qué efectos puede producir? ¿Cuáles son las magnitudes básicas que la caracterizan y cómo operar con ellas? ¿Qué peculiaridades tiene en los metales, electrolitos, gases y semiconductores?
3. Caracteriza las siguientes magnitudes eléctricas: a) intensidad de corriente, b) diferencia de potencial o voltaje, c) potencia eléctrica, d) fem, e) resistencia eléctrica.
4. Explica e ilustra mediante ejemplos, en qué consisten: a) la ley de Ohm, b) la ley de Faraday de la electrólisis, c) un semiconductor tipo n , d) un semiconductor tipo p , e) una conexión en serie de dispositivos eléctricos, d) una conexión en paralelo.
5. Caracteriza los siguientes dispositivos: a) potenciómetro, b) divisor de voltaje, c) reóstato, d) termorresistencia, e) fotorresistencia, f) diodo semiconductor, g) LED.
6. Al desplazar un pedazo de alambre, se mueve una cantidad inmensa de electrones con carga negativa y de núcleos atómicos con carga positiva en determinada dirección. ¿Constituye esto una corriente eléctrica? Explica.
7. El haz de electrones que se mueve hacia la pantalla en el tubo de pantalla de un televisor tradicional representa una corriente eléctrica. ¿Cuál es el sentido de dicha corriente? Argumenta.
8. ¿Cuál será la diferencia física entre el filamento de un bombillo de 60 W y otro de 100 W, si ambos son de wolframio?
9. La resistencia de un calentador eléctrico se rompió y al utilizar la parte en buen estado quedó más corta. ¿Cómo afectará esto su resistencia eléctrica? ¿Y la potencia que desarrolla?
10. Un equipo para 220 V puede ser conectado utilizando conductores más delgados que otro de igual potencia pero de 110 V. ¿Por qué?



11. Para transmitir la energía eléctrica a grandes distancias se utilizan voltajes muy elevados. ¿Por qué eso reduce las pérdidas de energía en las líneas de transmisión?
12. Cuando las aspas de un abanico que está girando son iluminadas con la luz de una lámpara fluorescente, a veces parecen detenerse o dar vueltas lentamente. Indaga qué relación tiene este efecto con la corriente alterna.
13. ¿Cómo es posible que un pájaro pueda posarse con sus dos patas en una línea de alto voltaje, mientras que para una persona puede resultar peligroso tocar el “vivo” de un enchufe?
14. Argumenta desde el punto de vista microscópico por qué en una electrólisis la cantidad de sustancia obtenida en los electrodos depende de la intensidad de la corriente eléctrica.
15. Identifica la fuente, los conductores y los dispositivos de control, en los circuitos de:
a) el motor de arranque de un auto, b) una linterna, c) una lámpara del alumbrado de la casa, d) una plancha eléctrica. Describe las principales transformaciones de energía que tienen lugar en dichos circuitos.
16. Comenta de dónde procede la energía eléctrica y en qué tipo de energía se transforma, durante el funcionamiento de los siguientes equipos e instalaciones: a) central eléctrica, b) linterna, c) abanico, d) televisor, e) lámpara en una instalación que funciona con paneles solares, f) batería mientras se carga.
17. Los electricistas suelen emplear una lamparita de neón para identificar el “vivo” y el neutro en un enchufe. Uno de sus terminales se sostiene entre los dedos y el otro se introduce en una de las ranuras del enchufe. Si se trata del “vivo”, la lamparita se enciende. ¿Por dónde fluye la corriente si aparentemente el circuito está abierto? ¿Cómo se explica desde el punto de vista microscópico el paso de la corriente por el gas que contiene la lamparita?
18. ¿En qué caso la diferencia de potencial entre los terminales de una batería puede ser mayor que su fem?
19. ¿Qué sucede con la intensidad de corriente en la rama principal de un circuito, cuando el número de consumidores conectados en paralelo aumenta? ¿Qué ocurre con la potencia? Argumenta tus respuestas.
20. Propón una serie de medidas que contribuyan a “ahorrar” energía eléctrica en tu casa.



2.4.5. Ejercicios de repaso.

1. Unos 1000 iones de Na^+ pasan en $7.2 \mu\text{s}$ a través de la membrana de cierta célula. ¿Cuál es la intensidad de corriente?

Respuesta: 1.4×10^8 iones/s

2. La intensidad de corriente típica del haz de electrones en el tubo de pantalla de un televisor tradicional es $200 \mu\text{A}$. ¿Cuántos electrones por segundo inciden en la pantalla?

Respuesta: 1.25×10^{15} electrones

3. Se carga una batería de automóvil mediante una corriente de 3.0 A durante 10 horas. ¿Qué carga eléctrica pasa a la batería? Las baterías de los automóviles especifican el número de amperes-hora ¿Qué significado tiene esta magnitud?

Respuesta: $1.1 \times 10^5 \text{ C}$

4. Una pila recargable de 1.2 V tiene una etiqueta que dice $1800 \text{ mA}\cdot\text{h}$ a) ¿Cuál es la máxima cantidad de carga que puede acumular? b) Y la máxima cantidad de energía? c) Serán exactas todas las cifras significativas que aparecen en el dato de la etiqueta?

Respuesta: a) 6480 C , b) $7.8 \times 10^3 \text{ J}$ ó 7.8 kJ , c) No

5. Una corriente superior a 10 mA puede ya ser perjudicial para el organismo humano. Una superior a 70 mA que pase por el torso durante más de un segundo podría resultar letal. Los tejidos internos tienen baja resistencia, la de la piel seca es mucho mayor pero si está mojada disminuye. Considera que la resistencia eléctrica de cierta persona que tiene buen contacto con tierra y toca un conductor con una mano mojada es $2.5 \times 10^3 \Omega$ y estima el máximo voltaje que puede tener el conductor para que la corriente no sea: a) perjudicial, b) fatal.

Respuesta: a) 25 V b) 175 V

6. Debido a su alta resistividad y resistencia a la oxidación, el nicromo (aleación de níquel y cobre) es utilizado en elementos calefactores, como por ejemplo en tostadoras. Considera un alambre de nicromo de 5.0 m de largo y 0.64 mm de diámetro y determina: a) su resistencia eléctrica, b) la intensidad de corriente al conectarlo a un enchufe de 110 V . La resistividad del nicromo es $1.5 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$

Respuesta: a) 23Ω , b) 4.7 A .





7. ¿Cuál es la potencia eléctrica del alambre de nicromo del problema anterior? ¿Y si se conecta a un enchufe de 220 V?

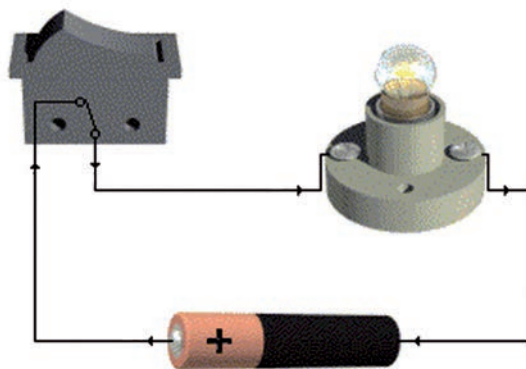
Respuesta: $5.2 \times 10^2 \text{ W}$; se cuadruplica: $2.1 \times 10^3 \text{ W}$

8. El foco de un automóvil, previsto para operar con una batería de 12 V, es de 40 W.
a) ¿Qué resistencia eléctrica tiene su filamento cuando está encendido? b) ¿Tendrá el mismo valor cuando está apagado? Argumenta.

Respuesta: a) 3.6Ω , b) No

9. Una pila eléctrica con una fem de 1.50 V y una resistencia interna de 0.283Ω se conecta a un pequeño bombillo cuya resistencia es 10.0Ω . Determina: a) la intensidad de corriente, b) la diferencia de potencial en los terminales del bombillo?

Respuesta: a) 146 mA, b) 1.46 V

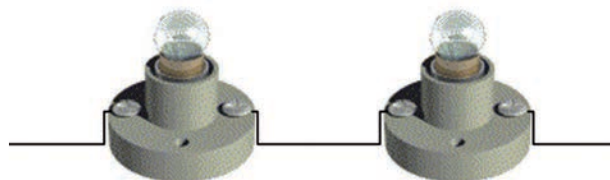


10. Una batería tiene una fem de 12.0 V y una resistencia interna de 0.050Ω . Sus terminales se conectan a dispositivo cuya resistencia es 3.0Ω . Determina: a) la intensidad de corriente, b) la diferencia de potencial en el resistor, c) la potencia desarrollada en el resistor, d) la caída de voltaje debida a la resistencia interna de la batería, e) la potencia desarrollada en la resistencia interna de la batería, f) la potencia desarrollada por la batería.

Respuesta: a) 3.9 A, b) 12 V, c) 46 W, d) 0.20 V, e) 0.77 W, f) 47.2 W

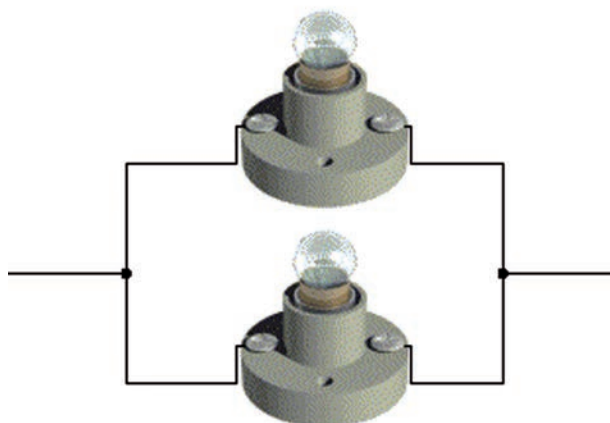
11. ¿Cuál será la resistencia total o equivalente de dos bombillos, cuyos filamentos tienen resistencias de 7Ω y 12Ω si se conectan: a) en serie, b) en paralelo.

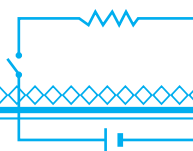
Respuesta: a) 19Ω , b) 4.4Ω .



12. Se dispone de un alambre de nicromo de 70.0Ω para confeccionar un calentador. ¿Cuál será su potencia si: a) se aplica a sus extremos una diferencia de potencial de 110 V, b) el alambre se corta en dos partes iguales, las cuales se conectan en paralelo al enchufe de 110 V?

Respuesta: a) 173 W, b) 692 W





13. La resistencia de cada bocina de cierto equipo estéreo es $3.00 \, \Omega$ y están previstas para una potencia máxima de 55 W. Si en los circuitos de cada bocina se colocan fusibles de 4.00 A, ¿estarán debidamente protegidas de sobrecorrientes?

Respuesta: No

14. Una secadora de cabello está diseñada para $1.2 \times 10^3 \, \text{W}$ y 110 V. a) ¿Cuál es su resistencia? b) Compara su potencia con la que desarrollaría si se conectara a un enchufe de 220 V y su resistencia permaneciera la misma.

Respuesta: a) $10 \, \Omega$, b) se cuadruplicaría: $4.8 \times 10^3 \, \text{W}$.

15. La intensidad de corriente en cierto calentador de 110 V es 14 A. a) ¿Cuál es su potencia? b) Si el calentador funciona 1 hora diaria y el costo del kWh es \$0.95, ¿cuánto habrá que pagar por el uso del calentador al cabo de 30 días?

Respuesta: a) $1.5 \times 10^3 \, \text{W}$, b) \$43

16. En una casa hay tres bombillos “ahorradores” de 20 W y otros dos de filamento de 60 W. Cada uno de estos dispositivos permanece encendido 3 horas al día. Determina el costo de la energía “consumida” por dichos bombillos en un mes (30 días) si cada kWh cuesta \$0.95.

Respuesta: \$ 15

17. Una familia sale de vacaciones 20 días y deja encendida una lámpara de 60 W. ¿Qué representa esto en el recibo mensual, si el costo del kWh es \$ 0.95?

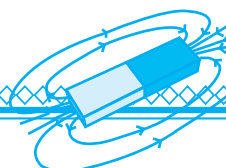
Respuesta: \$27



3

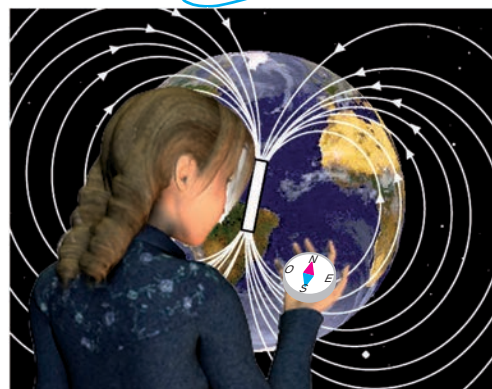
Magnetismo





En los primeros dos capítulos examinamos qué es la electricidad y cómo funcionan los circuitos eléctricos. En este capítulo y en el siguiente abordaremos el magnetismo y su relación con la electricidad.

El magnetismo desempeña un importante papel en la naturaleza y en la vida de los seres humanos (Fig. 3.1). La Tierra se comporta como un gigantesco imán permanente natural, y lo mismo ocurre con otros cuerpos celestes. La aplicación más antigua del magnetismo terrestre es la brújula, cuyo funcionamiento se basa en la orientación de una aguja magnética (un pequeño imán permanente) en el campo magnético de la Tierra. Se sabe que algunos organismos también pueden utilizar el campo magnético terrestre para orientarse, aunque los mecanismos mediante los cuales lo hacen aún no han sido completamente esclarecidos. En particular, ciertas aves se valen de la acción del campo magnético terrestre para orientarse durante las migraciones.



Indaga en una enciclopedia o en Internet acerca del magnetismo terrestre: sus características, origen, importancia práctica.

Se han construido imanes permanentes artificiales para muy variados fines: juntas de refrigeradores, cierre de puertas de algunos armarios, componente de bocinas electrodinámicas. Los extremos de algunas tijeras y destornilladores también están imantados.



¿Para qué se imantan los extremos de algunas tijeras y destornilladores?



Fig. 3.1. El magnetismo desempeña un importante papel en la naturaleza y en la vida de los seres humanos: las personas, y también ciertas aves, se valen del campo magnético terrestre para orientarse; grandes electroimanes son empleados en algunas chatarrerías; el magnetismo también es utilizado en los trenes de levitación y en los aceleradores de partículas subatómicas.



El magnetismo es utilizado en el levantamiento de pesados bloques de hierro o acero, la separación de metales en chatarrerías, el funcionamiento de motores, en algunos tipos de grabación y lectura de información, en los aceleradores de partículas subatómicas, en el funcionamiento de los trenes de levitación magnética, en ciertos tratamientos terapéuticos y en otros muchos equipos y dispositivos.

Argumenta, con ayuda de ejemplos, la importancia del magnetismo en la vida del hombre.

¿Y desde cuándo se conoce el magnetismo?



En este capítulo abordaremos las siguientes cuestiones clave:

¿Cuáles son las características de la acción magnética de los imanes? ¿Cómo se transmite la interacción magnética entre los cuerpos? ¿Qué relación tiene el magnetismo con la corriente eléctrica? ¿Cómo explicar el magnetismo que presentan los materiales, en particular el reforzamiento del campo magnético por los ferromagnéticos? ¿Cuáles son algunas de las aplicaciones del efecto magnético de la corriente eléctrica?

Un imán actúa sobre un cuerpo ferroso con cierta fuerza. ¿Actuará también el cuerpo ferroso sobre el imán? Argumenta. Realiza una experiencia que apoye tu respuesta.

3.1. Imanes e interacciones magnéticas.

¿Cuáles son las características de la acción magnética de los imanes?

Si alguna vez has manipulado imanes, seguramente habrás advertido que atraen a los cuerpos ferrosos y que la atracción es más intensa cuando el cuerpo se acerca a dos zonas determinadas del imán. Cuando el cuerpo se aproxima al imán por un lugar intermedio entre dichas zonas, entonces la fuerza prácticamente es nula. Esas dos regiones del imán que actúan con mayor intensidad sobre el cuerpo ferroso se denominan **polos magnéticos**, o simplemente **polos**.

También habrás notado que los polos de los imanes se comportan de modo parecido que las cargas eléctricas: entre ellos pueden ejercerse tanto fuerzas de atracción como de repulsión.

Como recordarás, en el caso de las cargas eléctricas, convencionalmente se llamó positiva a la que adquiere el vidrio al ser frotado con seda y negativa a la obtenida por el ámbar frotado con piel. En un imán se denomina “norte” al polo que luego de ser suspendido el imán y dejarlo oscilar libremente, termina

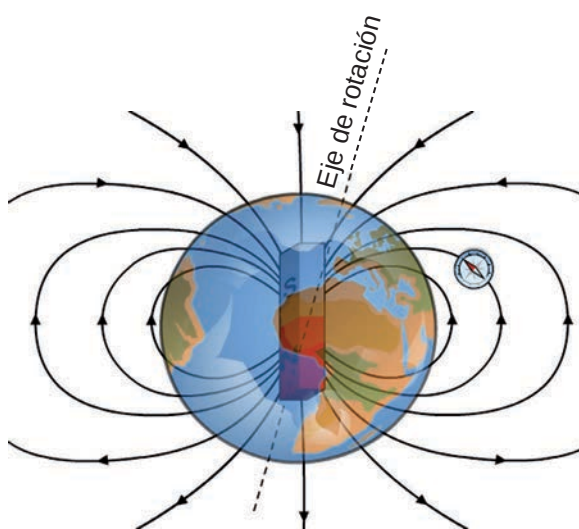


Fig. 3.2. Los polos magnéticos de la Tierra no coinciden con los geográficos. El norte de una aguja magnética apunta hacia un lugar situado al norte de Canadá.



¡De modo que el extremo del imán denominado polo norte se llama así porque apunta a un lugar cercano al Polo Norte de la Tierra!



apuntando hacia una región relativamente cercana al Polo Norte geográfico. Los polos magnéticos de la Tierra no coinciden con los geográficos (Fig. 3.2), lo que hace que el polo norte de la aguja magnética no apunte directamente hacia el norte geográfico, sino hacia un lugar al norte de Canadá. Dicho lugar, así como la configuración del campo magnético en torno a la Tierra varían con el tiempo.

La parte de un imán donde está su polo norte a veces se indica pintándola de rojo. Las agujas magnéticas de las brújulas son pequeños imanes y frecuentemente su parte norte también se pinta de rojo y la sur de azul.

De modo parecido que en el caso de las cargas eléctricas, los polos de dos imanes se repelen si son del mismo tipo y se atraen si son de distinto tipo (Fig. 3.3).

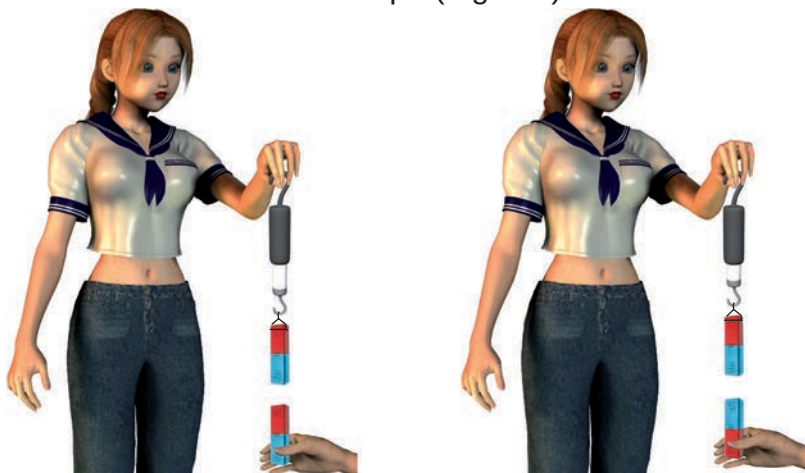
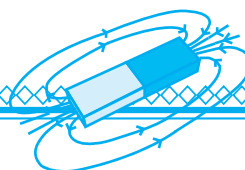


Fig. 3.3. Los polos de dos imanes se repelen si son del mismo tipo y se atraen si son de distinto tipo.

¿Cómo identificar los polos norte y sur de una aguja magnética en la que no se han señalado sus polos? ¿Cómo averiguar valiéndose de dicha aguja magnética, cuáles son los polos norte y sur de cierto imán?



En lo que respecta a su propiedad magnética, la Tierra se comporta de modo parecido a un gigantesco imán. ¿Dónde estarían los polos norte y sur de semejante "imán"?

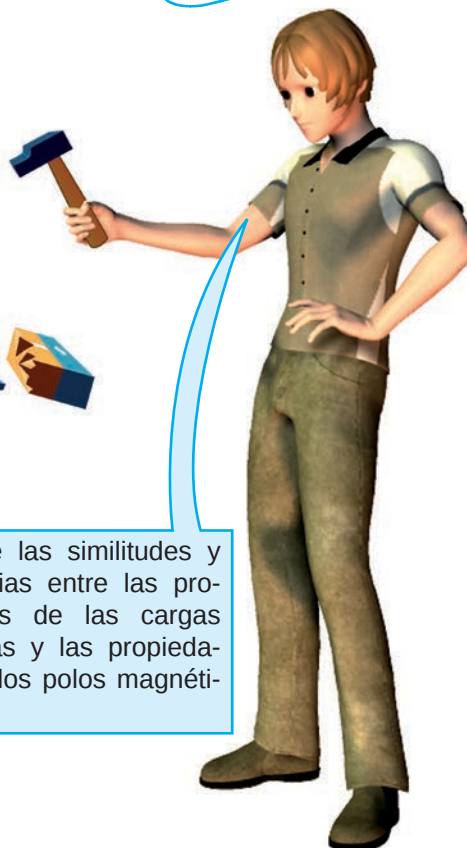


En 1750, los científicos determinaron que la fuerza de interacción entre los polos magnéticos de dos imanes varía inversamente proporcional con el cuadrado de la distancia que los separa, es decir, del mismo modo que años después se encontraría que varía la fuerza entre cuerpos esféricos con carga eléctrica.

Pero no obstante la gran similitud de las propiedades de los polos magnéticos y las propiedades de las cargas eléctricas, entre ellas existe una importante diferencia: **es posible tener un cuerpo con carga de un solo signo, pero es imposible tener un cuerpo magnetizado con un solo polo.** Los polos magnéticos siempre se encuentran en pareja y todos los intentos de aislar uno de otro han fracasado. Al dividir un imán en partes más pequeñas, cada parte siempre presenta dos polos, uno norte y otro sur.



Resume las similitudes y diferencias entre las propiedades de las cargas eléctricas y las propiedades de los polos magnéticos.



3.2. Campo magnético.

¿Cómo se transmite la interacción magnética entre los cuerpos?

Ya conoces que un cuerpo no puede actuar sobre otro **a distancia**, sin que intervenga algún intermediario. En la interacción entre cuerpos electrizados ese intermediario es, como ya sabes, el **campo eléctrico**. En el caso de la interacción magnética es el **campo magnético**.

Si tenemos dos imanes separados entre sí cierta distancia y movemos uno hacia el otro, la fuerza que se ejerce entre ellos varía, pero no instantáneamente. Sin embargo, el tiempo requerido para que “sientan” el cambio que ha ocurrido es extremadamente pequeño, la acción magnética se transmite, igual que la eléctrica, a unos 300 000 km/s. Sorprende la intuición de Michael Faraday, quien ya en 1832 escribió que la acción de un imán sobre otro “se propaga a partir de los cuerpos magnéticos poco a poco y para su propagación se requiere determinado tiempo”.

El campo magnético asociado a cierto cuerpo puede variar de un punto a otro del espacio que lo rodea. Para caracterizarlo se utiliza una magnitud que llamaremos, simplemente, **campo magnético** (también suele denominarse **inducción magnética**). Esta es una magnitud vectorial y, por tanto, no solo tiene determinado **valor**, sino también una **dirección** y un **sentido**. El símbolo utilizado para designarla es $\vec{B}$. En este apartado y en el siguiente examinaremos la dirección y el sentido del **vector campo magnético** asociado a diversos cuerpos que presentan magnetismo y luego, en el apartado 3.4, estudiaremos cómo determinar la magnitud o módulo de dicho vector.

La dirección del vector campo magnético ($\vec{B}$) en un punto del espacio es la que indica una aguja magnética (brújula) colocada en ese punto, y su sentido del polo sur al polo norte de la aguja.

Utilizando pequeñas agujas magnéticas es posible obtener una representación de la dirección y el sentido del vector campo magnético en los puntos que rodean a un cuerpo que presenta magnetismo (Fig. 3.4).

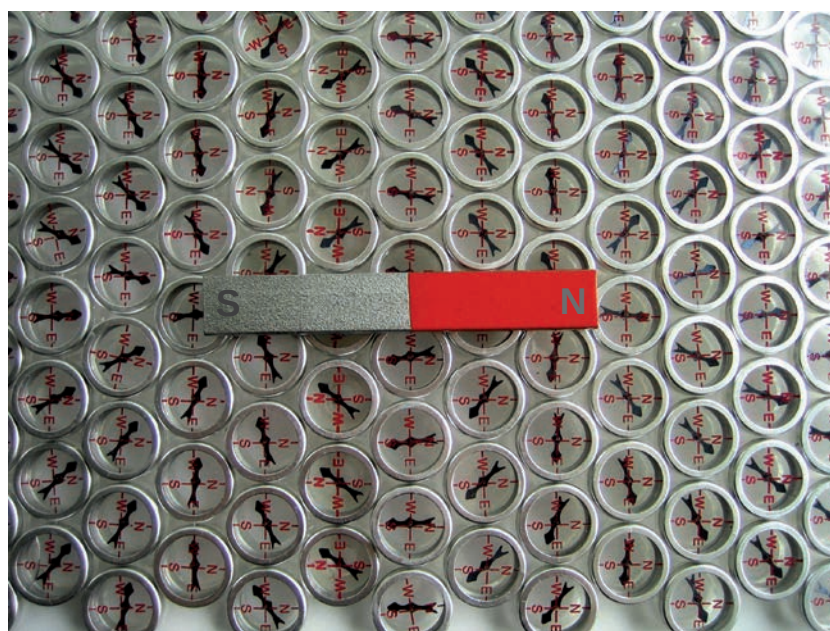
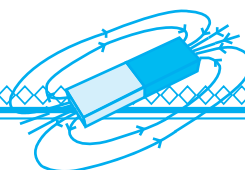


Fig. 3.4. Pequeñas agujas magnéticas colocadas en torno a un imán de barra permiten obtener una representación de la dirección y el sentido del vector campo magnético en los puntos que lo rodean.



También puede obtenerse una representación de la distribución del campo magnético empleando limaduras de hierro. La figura 3.5 muestra imanes alrededor de los cuales se han esparcido limaduras de hierro. Observa que las limaduras forman como unas líneas. El vector campo magnético es tangente a esas líneas en cada uno de sus puntos.

La disposición que adquieren las agujas magnéticas y las limaduras de hierro en torno a un cuerpo magnetizado sugiere representar el campo magnético por medio de líneas, como en el caso del campo eléctrico. Las **líneas de campo magnético** son tales que: 1) la tangente en cada uno de sus puntos tiene la dirección del **vector campo magnético** en esos puntos y 2) la separación entre ellas da idea de la magnitud del campo: donde están más unidas, el campo es más intenso y donde están más separadas, menos intenso.

El esquema de la figura 3.6a, muestra conjuntamente varias agujas magnéticas y líneas de campo magnético alrededor de un imán de barra. Nota que las líneas se han trazado de modo que las tangentes en los puntos donde están las agujas, tienen la dirección de éstas. En la figura 3.6b se ha dibujado una línea de campo y se ha representado el vector campo magnético $\vec{B}$ en uno de sus puntos. Dicho vector es tangente a la línea. Cabe subrayar que **las líneas de campo magnético no tienen existencia real, son solo un recurso para describir visualmente características básicas del campo.**

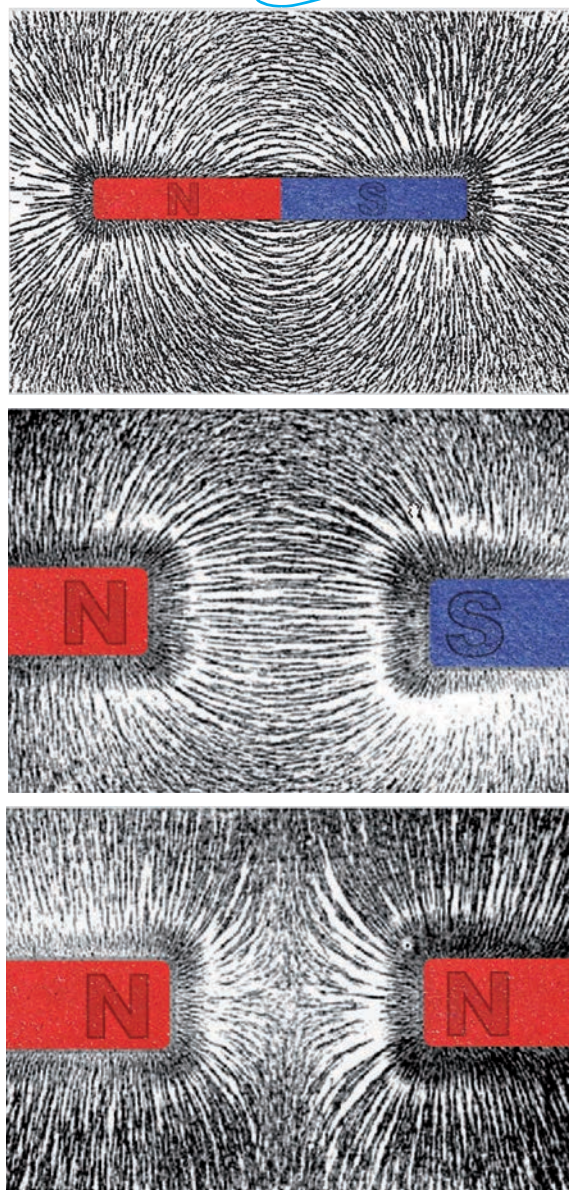
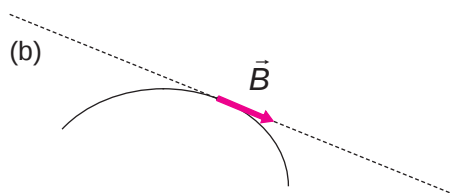
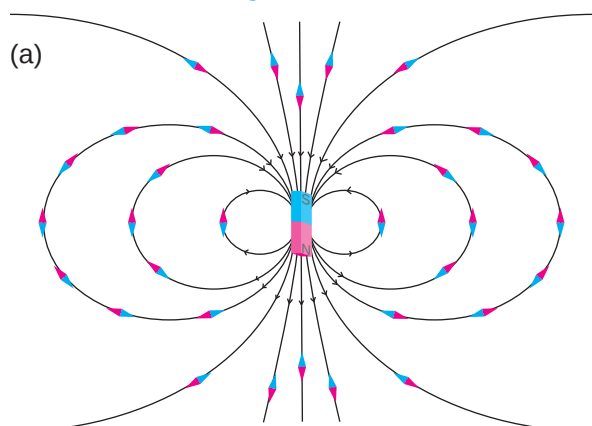
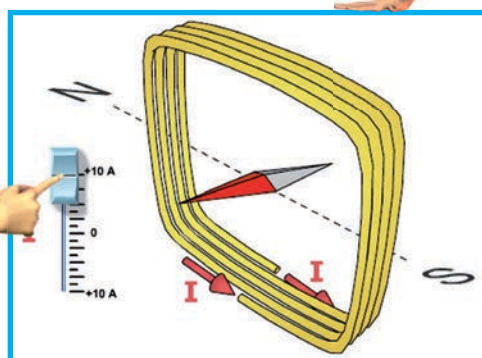


Fig. 3.5. Las limaduras de hierro esparcidas sobre una placa colocada encima de un imán dan idea de la distribución del vector campo magnético. Este es tangente a las líneas formadas por las limaduras.



¿Te atreverías a indicar la dirección y sentido del vector campo magnético alrededor de los imanes de la figura 3.5?

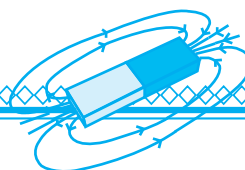
Fig. 3.6. a) Varias agujas magnéticas y líneas de campo magnético alrededor de un imán de barra. Las líneas se han trazado de modo que sus tangentes, donde se encuentran las agujas, tienen la dirección de éstas. b) El vector campo magnético es tangente a las líneas de campo en cada uno de sus puntos.



Describe algunos hechos que pongan de manifiesto el efecto magnético de la corriente eléctrica, en particular la experiencia de Oersted.

3.3. Corriente eléctrica y magnetismo.

En el apartado 2.1.2 conociste que una **corriente eléctrica puede provocar un efecto magnético, es decir, el efecto de un imán**. Este hecho fue descubierto por Hans Christian Oersted en 1819, durante un experimento que en su honor hoy lleva su nombre (Fig. 2.6a). **El experimento de Oersted representó el primer paso en el establecimiento de la relación entre la electricidad y el magnetismo.**



La figura 3.7 muestra la disposición que adoptan las limaduras cuando se esparcen en una cartulina que es atravesada por un conductor rectilíneo con corriente. En este caso las líneas de campo magnético son circunferencias que están en planos perpendiculares al conductor. El vector campo magnético es tangente a dichas líneas en cada uno de sus puntos. El sentido de las líneas de inducción se invierte si el sentido de la corriente es el opuesto.

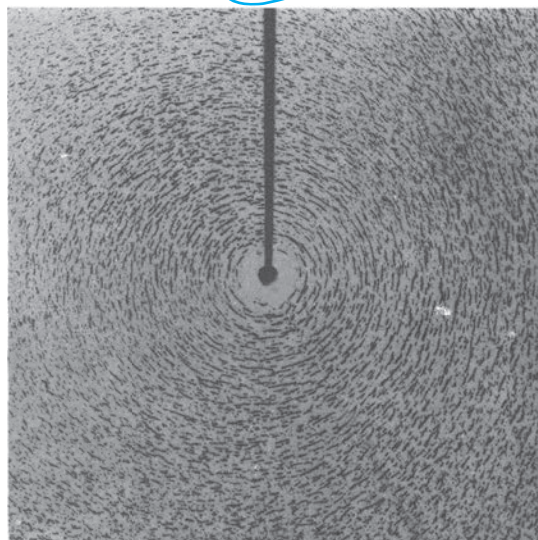


Fig. 3.7. Alrededor de un alambre recto con corriente eléctrica las limaduras de hierro se distribuyen formando circunferencias.

¿Cómo pudiera determinarse experimentalmente el sentido de las líneas de campo magnético en la situación de la figura 3.7.



Una regla útil para determinar de antemano el sentido de las líneas de campo correspondientes a los conductores con corriente consiste en lo siguiente: Se simula el agarre del conductor con la mano derecha, colocando el dedo pulgar de tal modo que apunte en el sentido de la corriente (Fig. 3.8). Los otros dedos indican el sentido de las líneas de campo magnético.

El pulgar se coloca apuntando en el sentido de la corriente.

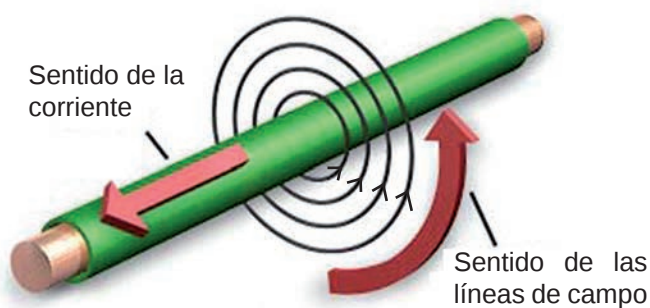


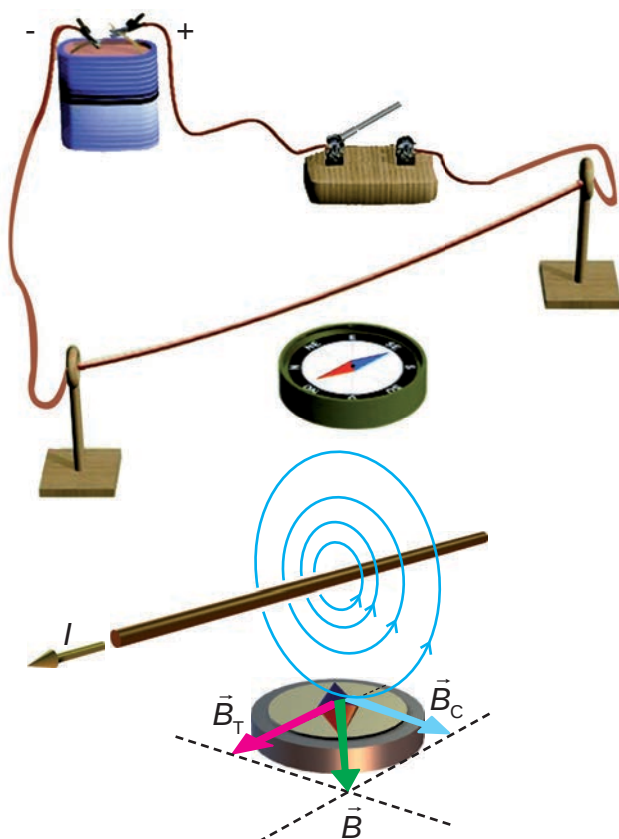
Fig. 3.8. El sentido de las líneas de campo de un conductor con corriente puede ser determinado mediante la "regla de agarre con la mano derecha".

En el experimento de Oersted (Fig. 2.6a) la aguja magnética está inicialmente orientada según las líneas del campo magnético de la Tierra. Cuando se hace pasar corriente eléctrica por el conductor colocado encima de la aguja, aparece un campo magnético adicional, que se añade al de la Tierra. La aguja magnética se orienta en la dirección del vector campo magnético resultante. En el ejemplo 3.1 analizamos esto detalladamente.

Ejemplo 3.1. Observa atentamente el esquema del experimento de Oersted de la figura que aparece a continuación: a) Los polos norte y sur de la aguja magnética; b) la dirección y sentido del vector campo magnético debido a la Tierra, en el lugar donde está la aguja; c) el sentido que tiene la corriente eléctrica en el conductor al cerrar el interruptor; d) la dirección y sentido del vector campo magnético debido al conductor con corriente, en el lugar donde se encuentra la aguja. ¿Cómo se explica la desviación de la aguja magnética?

a) El polo norte de la aguja está en el extremo de su lado pintado de rojo.

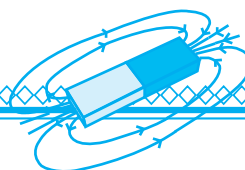
b) La dirección del vector inducción magnética debido a la Tierra, $\vec{B}_T$, es la indicada por la aguja magnética y su sentido, del sur al norte de la aguja.



c) El sentido acordado para la corriente eléctrica es el que va del polo positivo de la fuente al negativo.

d) Las líneas de campo magnético del conductor con corriente son circulares y están en planos perpendiculares al conductor. Puesto que la dirección del vector campo magnético es la de la tangente a esas líneas en cada uno de sus puntos, entonces en el lugar donde se encuentra la aguja el vector campo magnético debido al conductor con corriente, $\vec{B}_C$, es horizontal y perpendicular a la aguja. Su sentido puede ser determinado utilizando la “regla del agarre con la mano derecha”.

La aguja magnética se orienta en la dirección del vector campo magnético resultante, $\vec{B}$.



La figura 3.9 muestra la distribución de las limaduras de hierro para una espira con corriente. Mediante una brújula puede comprobarse que la espira se comporta como si tuviera un polo norte en una de sus caras y un polo sur en la otra. Al invertir el sentido de la corriente, también se invierten dichos polos, el que era norte pasa a ser sur y viceversa.

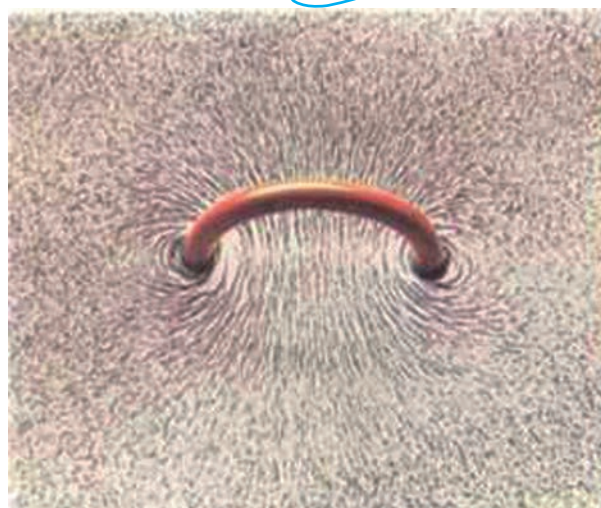


Fig. 3.9. Distribución de las limaduras de hierro en torno a una espira con corriente.



Considera que en la figura 3.9 la corriente circula de la parte derecha a la izquierda de la espira ¿Cuál será el sentido de las líneas de campo?

El valor del campo magnético de una espira con corriente se ve multiplicado cuando se tiene un enrollado de una serie de espiras, es decir, una **bobina**. La distribución de las limaduras de hierro en torno a una bobina alargada con corriente (solenoides) es muy similar a la de los imanes de barra (Fig. 3.10.). Esto significa que sus líneas de campo magnético también son muy similares.

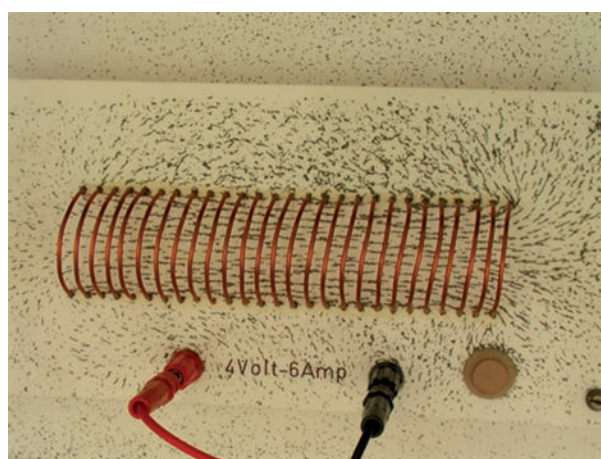


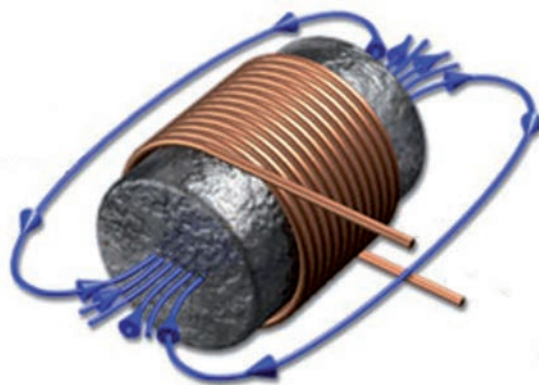
Fig. 3.10. Las líneas de campo correspondientes a un solenoide son muy similares a las de los imanes de barra.



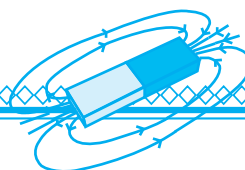
Si en las espiras del solenoide de la figura 3.10 la corriente fluye de la parte de abajo hacia la de arriba, ¿cuál es el sentido de las líneas de campo magnético?, ¿cuáles serían los polos norte y sur del solenoide?, ¿qué sucede al invertir el sentido de la corriente?

El valor del campo magnético de la bobina se incrementa al crecer el número de espiras, la intensidad de la corriente, o al introducirse en ella un material **ferromagnético** (material que se comporta de modo similar al hierro en un campo magnético). Los materiales ferromagnéticos posibilitan intensificar el campo de una bobina miles de veces.

El dispositivo constituido por una bobina con un núcleo de hierro se denomina **electroimán**. Ya en 1825 se construyó uno de aproximadamente 200 g que podía sostener una carga ¡de unos 6 kg! Actualmente se fabrican electroimanes capaces de retener cargas de decenas de toneladas. La limitación fundamental para continuar intensificando el campo magnético de los electroimanes, consiste en la elevación de temperatura al aumentar la intensidad de la corriente.



¿Cuáles son los polos norte y sur del electroimán de la figura? ¿Y el sentido de la corriente?



3.4. Fuerza de Ampere.

El experimento de Oersted evidenció que **un conductor por el que pasa corriente eléctrica puede actuar sobre una aguja magnética**. Pero sabemos que la acción de un cuerpo sobre otro no es unilateral, sino recíproca. Por consiguiente, **es de esperar que la aguja magnética también actúe sobre el conductor con corriente**. Y en efecto así es, el experimento de Oersted no lo hace evidente porque el conductor no puede moverse libremente y las fuerzas de interacción entre él y la aguja son muy pequeñas.

En 1820, André Marie Ampère estableció la ley para la fuerza de interacción entre dos pequeñas porciones de conductores con corriente eléctrica (elementos de corriente). Ampère no empleó el concepto de campo, pero hoy se sabe que la fuerza ejercida entre los conductores se debe al campo magnético que originan las corrientes. Por eso, en honor al científico, **la fuerza ejercida sobre un conductor con corriente situado en un campo magnético se denomina fuerza de Ampere**.

En la figura 3.11a se ha esquematizado una instalación que hace evidente la fuerza de Ampere. Un conductor cuelga en posición horizontal del extremo de una varilla y el conjunto es equilibrado sobre un pivote, formando una especie de balanza. Se coloca un imán de herradura de tal modo que el conductor quede entre sus polos. Cuando se hace pasar corriente eléctrica por el conductor, el conjunto se desequilibra, poniendo de manifiesto que sobre él ha actuado una fuerza. La magnitud de la fuerza puede medirse a partir del cuerpo que es necesario añadir, o

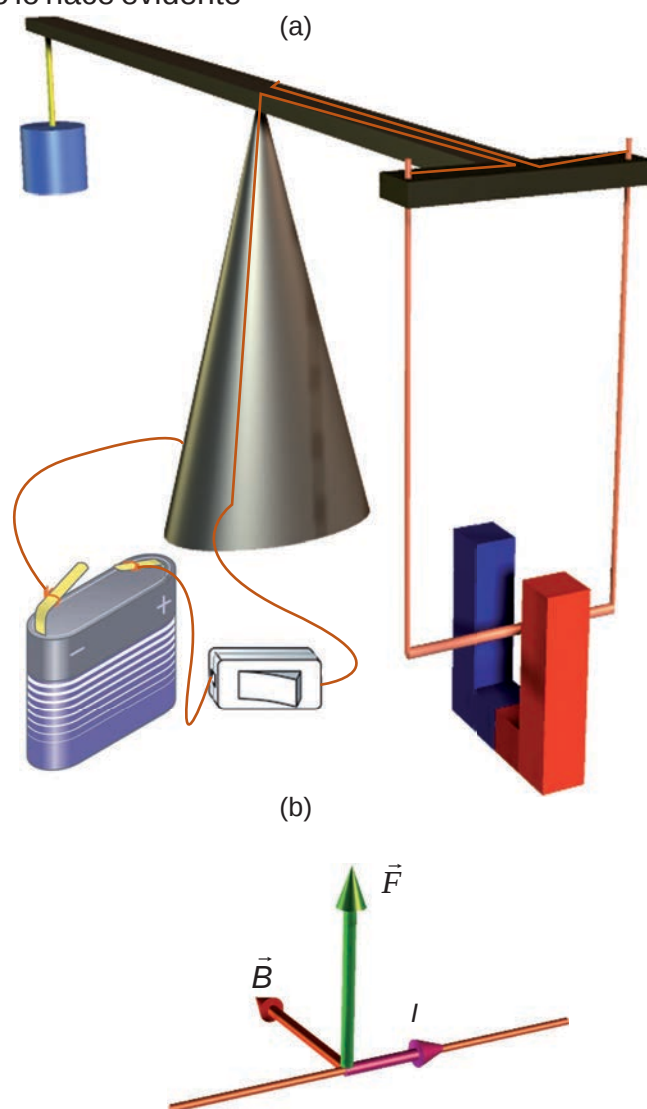


Fig. 3.11. (a) Esquema de una instalación que permite estudiar los factores de los que depende la fuerza que actúa sobre un conductor con corriente. (b) La fuerza es perpendicular a las líneas de campo y al conductor.

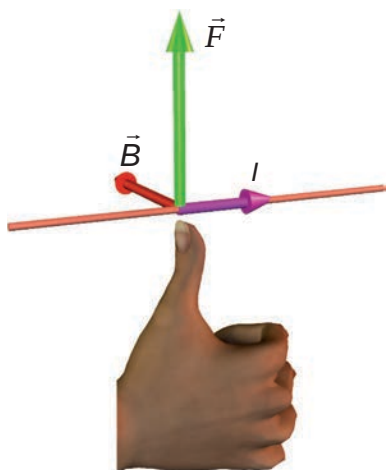


Fig. 3.12. “Regla de la mano derecha” para determinar el sentido de la fuerza que actúa sobre un conductor con corriente situado en un campo magnético.



suprimir, en el otro extremo de la varilla para restituir el equilibrio.

A continuación resumimos algunos resultados de los ensayos realizados con una instalación como la descrita:

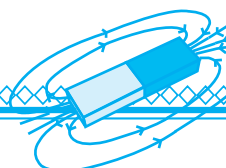
1. La fuerza de Ampere ejercida sobre un conductor con corriente situado en un campo magnético es perpendicular a las líneas de campo y al conductor, o sea, perpendicular al plano determinado por ellos. (Fig. 3.11b).

2. Al invertir el sentido de la corriente también se invierte el sentido de la fuerza, y lo mismo ocurre al invertir la polaridad del imán. Para determinar el sentido de la fuerza de Ampere puede utilizarse la ‘regla de la mano derecha’. La figura 3.12 ilustra en qué consiste en este caso: si los cuatro dedos simulan un movimiento que va de la flecha que indica el sentido de la corriente a la flecha que indica la línea de campo magnético, entonces el pulgar señalará el sentido de la fuerza.

Utiliza la regla de la mano derecha para comprobar que en el caso representado en la figura 3.11 el sentido de la fuerza es el indicado. Verifica mediante dicha regla que al invertir el sentido de la corriente o de las líneas de campo, también se invierte el sentido de la fuerza.

3. Variando la intensidad de corriente en el conductor es posible comprobar que el valor de la fuerza de Ampere es directamente proporcional a la intensidad de la corriente ($F \propto I$).

4. Para comprender el resultado que sigue es preciso tener en cuenta que el campo magnético de un imán como el representado está principalmente limitado a la región entre sus polos, lo cual significa que la fuerza prácticamente solo actúa sobre la porción de conductor que queda directamente entre ellos. Por consiguiente, si junto a ese imán se coloca otro idéntico, entonces la longitud de conductor sobre la que actúa el campo se duplica. Resulta que al hacer esto la fuerza también se duplica, lo cual sugiere que el valor



de la fuerza de Ampere es directamente proporcional a la longitud ΔL de la porción de conductor sobre la que actúa el campo magnético ($F \propto \Delta L$).

Sí, y cuando, por ejemplo, la parte de conductor sobre la que actúa el campo disminuye a la mitad, la fuerza también se reduce a la mitad.

Entonces si en el conductor de la figura 3.11 se tiene una corriente de 1 A y luego se aumenta hasta 2 A, ¿la fuerza se duplica?

5. El valor de la fuerza de Ampere depende del ángulo formado entre el conductor y las líneas de campo magnético. Tiene su valor máximo cuando el conductor es perpendicular a dichas líneas y es nulo si es paralelo a ellas.

¿Cómo habría que colocar el conductor en la instalación de la figura 3.11 para que la fuerza de Ampere sobre él fuese nula?

De los tres últimos resultados puede escribirse, para el caso en que el conductor es perpendicular a las líneas de campo:

$F_m \propto I\Delta L$, donde F_m es la fuerza máxima.

Esta conclusión también es posible expresarla en la forma:

$$\frac{F_m}{I\Delta L} = \text{constante}$$

Esto significa que si el campo magnético no varía, dicho cociente se mantiene constante, aún cuando varíen la intensidad de corriente y la longitud de la porción de conductor que recibe la acción del campo. Por otra parte, al cambiar el campo magnético, por ejemplo utilizando imanes más o menos “fuertes”, el cociente $F_m / I\Delta L$ también cambia.

El hecho de que el cociente $F_m / I\Delta L$ dependa del campo magnético, pero no de I ni de ΔL , sugiere utilizar ese cociente para determinar la magnitud del campo. De ahí que:

$$B = \frac{F_m}{I\Delta L}$$





Cabe advertir que esta fórmula es válida solo si el conductor es recto y el campo magnético que actúa sobre él es igual a todo su largo.

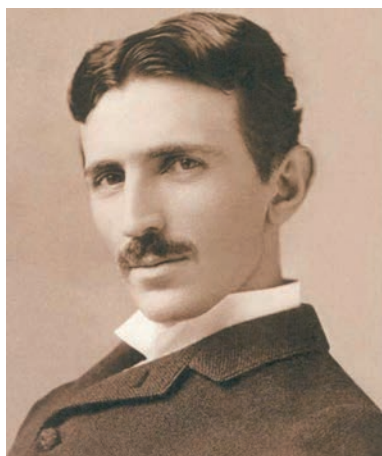
En los apartados anteriores vimos que, utilizando una pequeña aguja magnética es posible conocer la dirección y el sentido del vector campo magnético. Ahora acabamos de ver cómo determinar su valor. Ilustremos esto último mediante un ejemplo concreto:

Ejemplo 3.2. Considera que en la instalación de la figura 3.11a el conductor es perpendicular a las líneas de campo, la intensidad de corriente 4.0 A, la longitud de la porción de conductor sobre la que actúa el campo 2.0 cm y la fuerza medida mediante la balanza 0.0050 N. ¿Cuál es el valor del campo magnético entre los polos del imán?

Como el conductor es perpendicular a las líneas de campo, la fuerza de 0.0050 N medida mediante la balanza es la máxima posible. De ahí que podamos utilizar la expresión:

$$B = \frac{F_m}{I \Delta L}$$

$$B = \frac{0.0050 \text{ N}}{(4.0 \text{ A})(2.0 \times 10^{-2} \text{ m})} = 5.0 \times 10^{-2} \frac{\text{N}}{\text{Am}}$$



Nikola Tesla (1856-1943): La unidad de campo magnético en el SI recibe el nombre de tesla (T) en su honor.

En el ejemplo anterior se ha expresado el resultado en $\text{NA}^{-1}\text{m}^{-1}$. Esta unidad recibe el nombre de **tesla (T)**, en honor de Nikola Tesla (1856-1943), ingeniero de origen croata, a quien se deben múltiples invenciones e innovaciones relacionadas con la generación y transmisión de la energía eléctrica.

En la tabla 3.1 se dan algunos valores de campo magnético que pueden ser de interés.

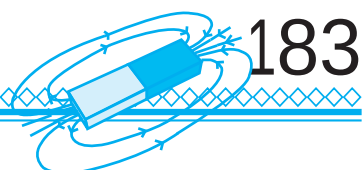


Tabla 3.1. Campo magnético de algunos cuerpos y dispositivo

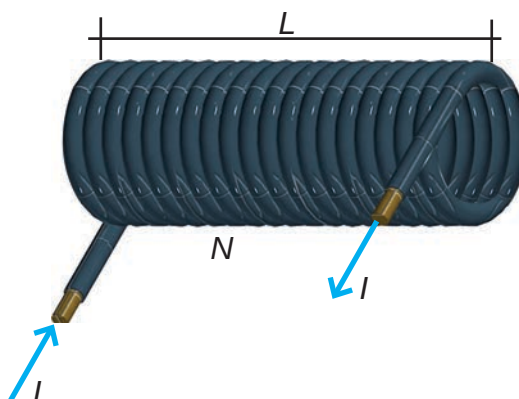
Cuerpo o instalación	Campo magnético en tesla (T)
En el cerebro humano (debido a impulsos nerviosos)	1×10^{-13}
A 1 cm de un conductor recto y largo para $I = 1$ A	2.0×10^{-5}
En la superficie de la Tierra	$(3 - 6) \times 10^{-5}$
En la superficie de Júpiter	4.0×10^{-4}
En el interior de una bobina de 1 000 espiras para $I = 1$ A	1×10^{-3}
Cerca de un pequeño imán de barra	1×10^{-2}
Cerca de un electroimán mediano	1.5
En la superficie de una estrella neutrónica	1×10^8

Hemos visto cómo utilizando un conductor de longitud conocida y haciendo pasar por él una corriente de intensidad también conocida puede determinarse el valor del campo magnético. Pero este procedimiento es actualmente poco práctico. Hoy se dispone de instrumentos con sensores que permiten determinar directamente el valor del campo magnético. Por otra parte, se han encontrado procedimientos y fórmulas para calcular el valor del campo magnético en diversas situaciones. Por ejemplo, para el campo magnético a una distancia r de un conductor recto y largo por el que pasa una corriente de intensidad I se tiene:

$$B = \left(2.0 \times 10^{-7} \frac{\text{Tm}}{\text{A}} \right) \frac{I}{r}$$

Y para el interior de un solenoide largo de longitud L y N espiras bien juntas por las que pasa una corriente de intensidad I :

$$B = \left(4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{Tm}}{\text{A}} \right) \frac{NI}{L}$$





Ejemplo 3.3. Calcula el valor del campo magnético de un alambre largo y recto por el que pasa una corriente de intensidad 1.0 A, a una distancia del conductor de: a) 1.0 cm b) 20.0 cm. Compara los valores obtenidos con el del campo magnético de la Tierra.



$$a) \quad B = \left(2.0 \times 10^{-7} \frac{\text{Tm}}{\text{A}} \right) \frac{I}{r}$$

$$B = \left(2.0 \times 10^{-7} \frac{\text{Tm}}{\text{A}} \right) \frac{1.0 \text{ A}}{1.0 \times 10^{-2} \text{ m}}$$

$$B = 2.0 \times 10^{-5} \text{ T}$$

b) Puesto que el valor del campo magnético correspondiente al conductor considerado varía inversamente proporcional con la distancia a él, entonces, sin necesidad de hacer cálculos nuevamente, puede afirmarse que el valor del campo magnético a 20 cm de distancia es 20 veces menor que a 1 cm, es decir, $1.0 \times 10^{-6} \text{ T}$.

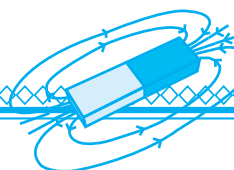
El valor del campo magnético de la Tierra varía de un lugar a otro de su superficie, pero según la tabla 3.1 está entre $3 \times 10^{-5} \text{ T}$ y $6 \times 10^{-5} \text{ T}$. Por consiguiente, el valor del campo magnético a 1 cm del conductor es solo algo inferior que el de la Tierra, mientras que 20 cm es algo más de 30 veces menor.

Lo anterior permite comprender por qué si se tiene orientada una aguja magnética en el campo de la Tierra y se coloca un conductor a una distancia de ella de alrededor de 1 cm, como en el experimento de Oersted, la desviación de la aguja será notable, pero si se coloca a 20 cm, entonces la desviación no será perceptible.

Ejemplo 3.4. Calcula el valor del campo magnético en el interior de un solenoide de longitud 10 cm y 500 espiras por las que pasa una corriente de intensidad 1.0 A.

$$B = \left(4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{Tm}}{\text{A}} \right) \frac{NI}{L} = \left(4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{Tm}}{\text{A}} \right) \frac{(500)(1.0 \text{ A})}{10 \times 10^{-2} \text{ m}} = 5.0 \times 10^{-3} \text{ T}$$

Nota que la intensidad de corriente en el solenoide considerado es la misma que en el conductor del ejemplo anterior. Sin embargo, en este caso el valor del campo magnético es 100 veces mayor que el de la Tierra. Mientras mayor sea el número de espiras del solenoide, mayor será el valor del campo magnético.



Si el valor de cierto campo magnético es conocido, porque aparece en una tabla, se ha medido, o se ha calculado mediante una fórmula, entonces es posible utilizar la expresión $B = F_m / I \Delta L$ para calcular la fuerza de Ampere sobre un conductor con corriente **situado perpendicularmente a las líneas de campo**:

$$F_m = B I \Delta L$$

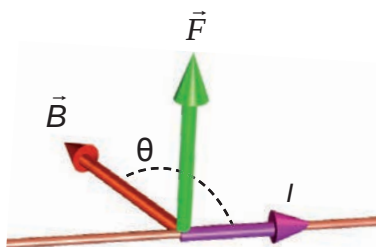
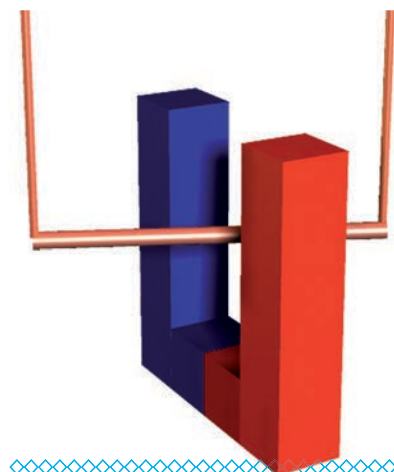
Ya hemos dicho que si el conductor no es perpendicular a la líneas de campo, la fuerza de Ampere tiene otro valor y que si es paralelo a ellas, dicha fuerza es cero. Variando el ángulo entre el conductor y las líneas de campo en la instalación de la figura 3.11 y midiendo la fuerza de Ampere, es posible comprobar que ella es proporcional al seno del ángulo. De modo que:

La fuerza de Ampere sobre una porción de conductor de longitud ΔL , con corriente de intensidad I , y situado en un campo magnético uniforme de valor B de modo que forma un ángulo θ con las líneas de campo es:

$$F = B I \Delta L \sin \theta$$

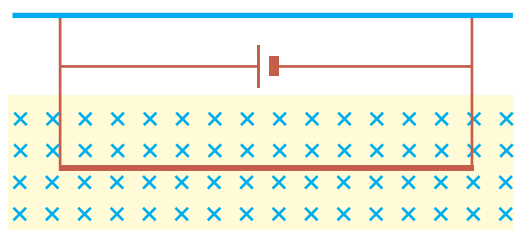
Esta ecuación a veces también se denomina **ley de Ampere para la fuerza magnética**.

Nota que si el ángulo θ formado entre el conductor y las líneas de campo es 90° , entonces de la ecuación anterior se obtiene el caso particular $F_m = B I \Delta L$.





Ejemplo 3.5. Un conductor está situado en un campo magnético uniforme colgado horizontalmente de dos alambres, como se muestra en la figura. a) ¿Cuáles son la dirección y el sentido de la fuerza que actúa sobre el conductor? b) ¿Cuál es su valor, si la intensidad de corriente es 1.0 A, la longitud del conductor 5.0 cm y el campo magnético de 1.0 T? c) ¿Cuáles son las direcciones y sentidos de las fuerzas que actúan sobre los alambres que cuelgan? c) Si el imán que crea el campo magnético se gira de tal modo que las líneas de campo permanecen horizontales pero forman 30° con el conductor, qué fuerza actúa sobre éste?



a) La fuerza de Ampere que actúa sobre el conductor es perpendicular a él y a las líneas de campo, es decir, tiene la dirección vertical. Utilizando la regla de la mano derecha se encuentra que está dirigida hacia arriba.

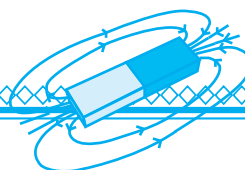
b) El valor de la fuerza es $F = BI\Delta L \sin\theta$. Como el conductor es perpendicular a las líneas de campo, $\theta = 90^\circ$, por lo que $\sin\theta = 1$ y queda:

$$F = BI\Delta L = (1.0 \text{ T})(1.0 \text{ A})(5.0 \times 10^{-2} \text{ m}) = 5.0 \times 10^{-2} \text{ N}$$

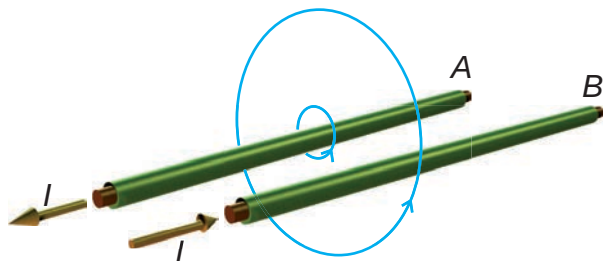
c) Las fuerzas que actúan sobre los alambres son perpendiculares a ellos y a las líneas de campo. Utilizando la regla de la mano derecha se encuentra que sobre el conductor de la izquierda la fuerza es hacia la derecha y sobre el de la derecha la fuerza es hacia la izquierda.

d) Como en este caso el ángulo formado entre el conductor y las líneas de campo es 30° , se tiene:

$$F = BI\Delta L \sin\theta = (1.0 \text{ T})(1.0 \text{ A})(5.0 \times 10^{-2} \text{ m}) \sin 30^\circ = (5.0 \times 10^{-2} \text{ N})(0.5) = 2.5 \times 10^{-2} \text{ N}$$



Ejemplo 3.6. Dos largos conductores con corriente están situados a cierta distancia uno de otro paralelos entre sí. Los sentidos de las corrientes son opuestos. ¿Cuáles son las direcciones y sentidos de las fuerzas ejercidas entre sus porciones centrales?



En la figura se han representado dos conductores con corriente, A y B, y líneas del campo magnético correspondientes al conductor A. Observa que en los puntos que las líneas intersectan al conductor B, son perpendiculares a él. Sobre el conductor B actúa la fuerza de Ampere debida al campo magnético de A. Dicha fuerza es perpendicular al conductor y al vector campo magnético sobre él.

El sentido del campo originado por el conductor A se determina utilizando la regla de la mano derecha. El de la fuerza de Ampere sobre el conductor B también puede determinarse mediante dicha regla. Como resultado se obtiene que el sentido de la fuerza sobre el conductor B, es del conductor A hacia el B. Un razonamiento análogo lleva a la conclusión que el sentido de la fuerza sobre el conductor A, es del conductor B hacia el A. Por tanto, entre los conductores se ejercen fuerzas de repulsión mutuas.

Determina tú mismo el sentido de las fuerzas en el caso que las corrientes en los conductores tengan iguales sentidos.

3.5. Fuerza de Lorentz.

La corriente eléctrica en un conductor está constituida por un movimiento de partículas con carga. Por eso es lógico pensar que **la fuerza sobre un conductor con corriente situado en un campo magnético se debe a la acción de dicho campo sobre las partículas cargadas que se mueven en su interior.**

Sí, pero el movimiento de los electrones que forma la corriente eléctrica no es al que te estás refiriendo, se trata del movimiento adicional orientado que ellos adquieren al conectar la fuente.



Recuerdo que en la unidad anterior se dijo que en el caso de los conductores metálicos los electrones se mueven a miles de kómetros por segundo.

El experimento de la figura 3.13 evidencia que, ciertamente, sobre las partículas con carga que se mueven en un campo eléctrico actúa una fuerza. Un haz de electrones va en línea recta de un lado a otro de un tubo de vidrio, pero al acercar un imán, el haz se desvía, lo que indica que sobre los electrones ha actuado una fuerza.

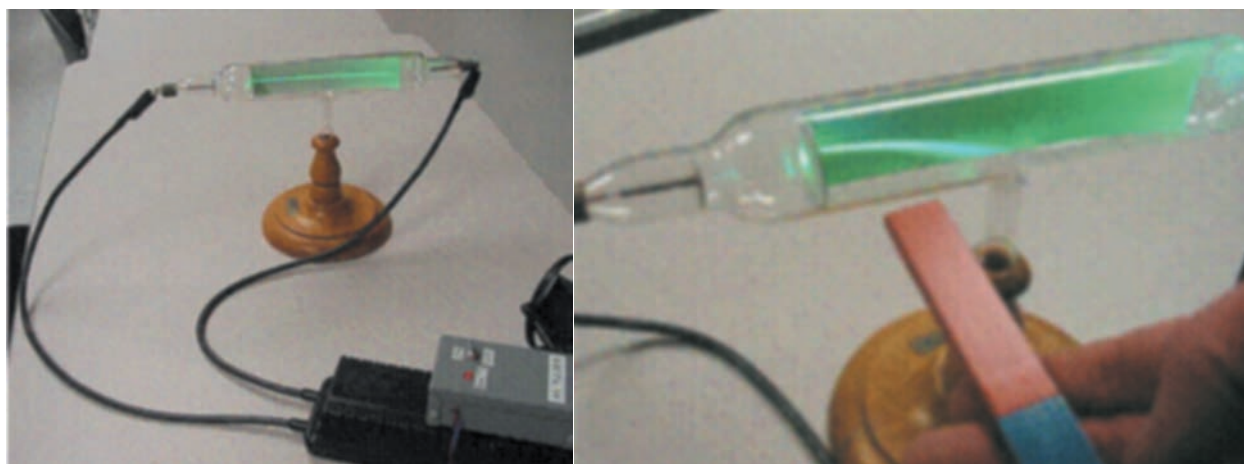
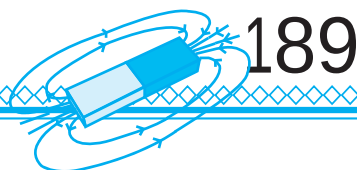


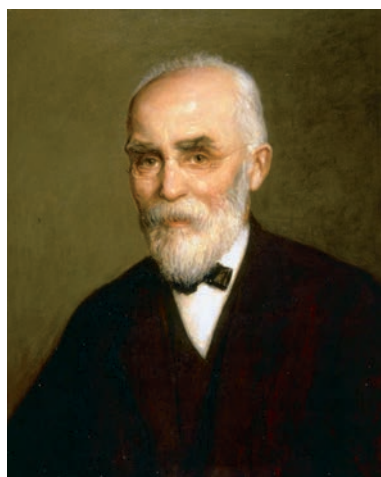
Fig. 3.13. (a) Un haz de electrones va de un extremo a otro del tubo en una trayectoria rectilínea. (b) Al acercar un imán al tubo, el haz se desvía.



Mientras que el campo eléctrico actúa sobre las partículas cargadas ya estén en reposo o en movimiento, el campo magnético lo hace solo cuando están en movimiento. Esto permite distinguir la acción del campo magnético sobre partículas cargadas, de la acción del campo eléctrico sobre ellas.

El polo norte de un imán recto se aproxima a una regla de plástico cargada negativamente. ¿La fuerza que experimenta la regla será de atracción, repulsión o nula?

La fuerza que actúa sobre una partícula cargada en movimiento debido a un campo magnético se denomina **fuerza de Lorentz**, en honor del científico holandés Hendrik A. Lorentz.



Hendrik A. Lorentz (1853-1928). Científico holandés, fundador de la teoría electrónica, premio nobel de física por sus estudios de la acción del campo magnético sobre las radiaciones, también realizó contribuciones a la teoría de la relatividad.

Podemos concluir que, como habíamos pensado, en el experimento de la figura 3.11 actúa una fuerza sobre el conductor porque sus electrones en movimiento reciben la acción de la fuerza de Lorentz.

Si los electrones en un conductor metálico se mueven a miles de kilómetros por segundo, ¿no debiera entonces actuar sobre ellos una fuerza, y por tanto también sobre el conductor, aún sin conectarlo a una fuente?

Sí, pero como el movimiento de los electrones sin conectar la fuente se realiza en todas direcciones por igual, las fuerzas también actúan sobre ellos en todas direcciones, lo que da por resultado una fuerza neta nula sobre el conductor. Solo cuando el movimiento de los electrones se orienta en determinada dirección aparece una fuerza neta.





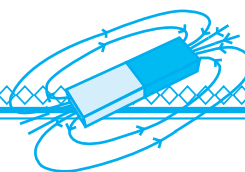
La expresión matemática de la fuerza de Lorentz puede ser deducida a partir de la expresión de la fuerza de Ampere sobre un conductor con corriente, a fin de cuentas la corriente son partículas cargadas en movimiento. Sin embargo, no haremos tal deducción, nos limitaremos a describir las características de la fuerza de Lorentz y a escribir la fórmula que permite calcular su valor:

1. Aunque el movimiento de electrones en el experimento de la figura 3.13 no tenga lugar en un conductor, representa una corriente eléctrica. Por eso, partiendo de las características de la fuerza de Ampere no es difícil llegar a la conclusión que **la fuerza sobre las partículas cargadas que se mueven en un campo magnético (fuerza de Lorentz) es perpendicular a la velocidad v de ellas y al vector campo magnético $\vec{B}$.**

2. Lo anterior explica la trayectoria curva que siguen las partículas: puesto que la fuerza es perpendicular a la velocidad de las partículas, provoca un cambio en su dirección. Por otra parte, al ser la fuerza siempre perpendicular a la velocidad, no posee componente en la dirección de ella, por lo que no origina incremento alguno de su valor. En otras palabras, **la fuerza de Lorentz no provoca incremento de la energía cinética de las partículas, dicha fuerza no realiza trabajo.**

3. Como en el caso de la fuerza de Ampere, aquí también el sentido de la fuerza depende de los sentidos de la corriente y del vector campo magnético. **Para determinar el sentido de la fuerza de Lorentz puede utilizarse la regla de la mano derecha”.**

La figura 3.14 ilustra cómo aplicarla en este caso. Observa que la única diferencia con la regla para determinar el sentido de la fuerza de Ampere (Fig. 3.12) es que I debe ser sustituido por v . No obstante, debes tener en cuenta que **la velocidad v es la de cargas positivas**. Así, en el experimento de la figura 3.13 se trata de movimiento de electrones, lo que equivale a una corriente de cargas positivas en sentido opuesto. Esto significa que si los electrones se están moviendo de izquierda a derecha,



entonces para hallar el sentido de la fuerza de Lorentz debe considerarse que el sentido de la velocidad es de derecha a izquierda.

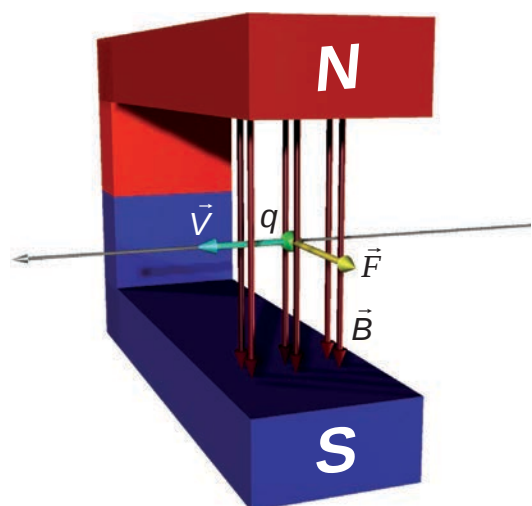
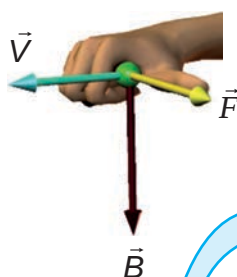


Fig. 3.14. “Regla de la mano derecha” para determinar el sentido de la fuerza que actúa sobre una partícula cargada que se mueve en un campo magnético. La velocidad $\vec{v}$ corresponde a la de cargas positivas.

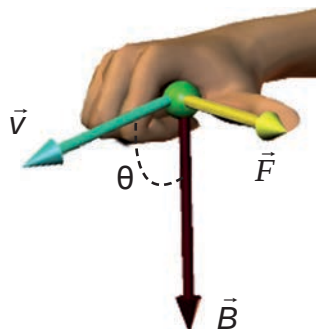


¿Entonces la dirección y el sentido de la fuerza de Lorentz se hallan del mismo modo que para la fuerza de Ampere, sólo que empleando $\vec{v}$ en lugar de I ?

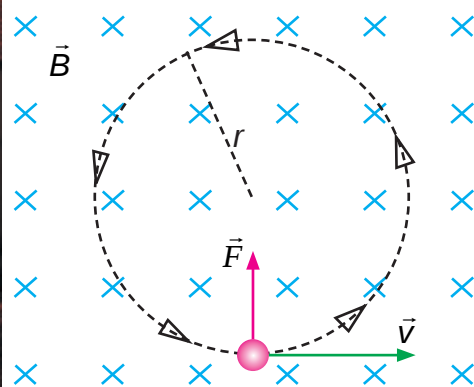
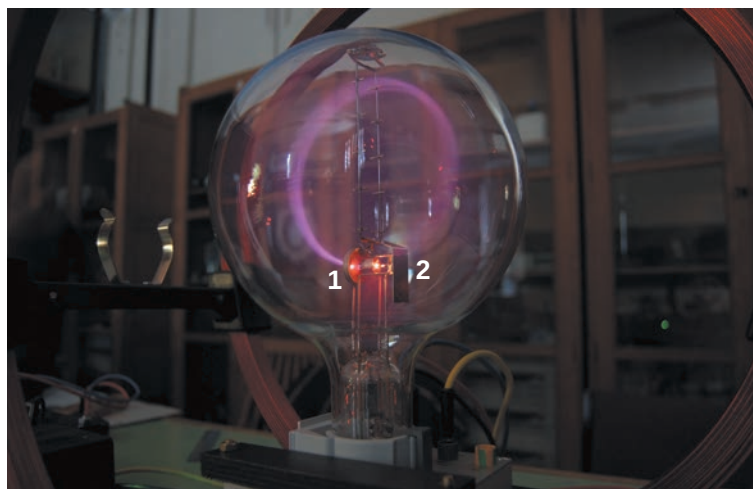
Sí, pero recuerda que v se refiere a la velocidad de cargas positivas, porque ella es la que indica el sentido de la corriente, que es el del movimiento de cargas positivas.

4. El valor de la fuerza Lorentz sobre una partícula de carga q cuya velocidad $\vec{v}$ forma un ángulo θ con el vector campo magnético $\vec{B}$ es:

$$F = qvB\sin\theta$$



Ejemplo 3.6. Un haz de electrones se mueve en una trayectoria circular, de 1 a 2, en un campo magnético uniforme, como se muestra en la foto. a) ¿Cuál es el sentido de las líneas de campo? b) Si en 1 la velocidad de los electrones es 1.0×10^7 m/s, ¿cuál será la velocidad de ellos en 2? c) Se sabe que la carga eléctrica del electrón es 1.60×10^{-19} C y el campo magnético en la experiencia de la foto de 8.0×10^{-4} T, ¿cuál es el valor de la fuerza que actúa sobre los electrones?

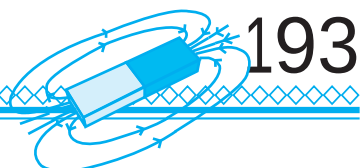


a) La velocidad $\vec{v}$ de los electrones es tangente a la trayectoria que describen, en cada uno de sus puntos. Por otra parte, el movimiento de los electrones de 1 a 2 equivale al de cargas positivas de 2 a 1.

Teniendo en cuenta lo anterior, en el esquema de la derecha se ha representado la velocidad $\vec{v}$ de una partícula con carga positiva, en un punto de la trayectoria circular. Para que la trayectoria sea circular, sobre la partícula debe actuar todo el tiempo una fuerza dirigida hacia el centro de la circunferencia, es decir, centrípeta. En el esquema también se ha representado esta fuerza $\vec{F}$.

Las líneas de campo son perpendiculares a los vectores velocidad y fuerza. El sentido de ellas puede ser determinado utilizando la regla de la mano derecha. Cuando el pulgar se dirige en el sentido de $\vec{F}$ y se hace girar la mano a partir del extremo de $\vec{v}$, entonces los otros dedos indican dónde debe estar el extremo del vector campo magnético. Si realizas las operaciones indicadas podrás comprobar que, en el esquema, el vector campo magnético está dirigido como se indica, hacia el interior de la hoja. Las líneas de campo tienen esa misma dirección.

b) Como la fuerza es siempre perpendicular a $\vec{v}$, no provoca variación en el valor de la velocidad de los electrones. De modo que seguirá siendo 1.0×10^7 m/s a lo largo de toda la trayectoria.



c) El valor de la fuerza que actúa sobre los electrones debido al campo magnético es $F = qvB\sin\theta$. Puesto que todo el tiempo $\vec{v}$ y $\vec{B}$ son perpendiculares, $\theta = 90^\circ$. Por consiguiente:

$$F = qvB = (1.60 \times 10^{-19} \text{ C}) \left(1.0 \times 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) (8.0 \times 10^{-4} \text{ T}) = 1.3 \times 10^{-15} \text{ N}$$

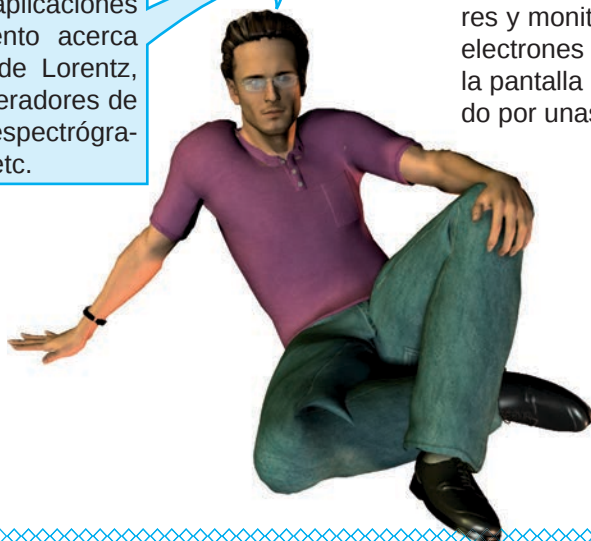
Nota que la fuerza ejercida sobre los electrones es extremadamente pequeña y la velocidad de ellos inmensa. ¿Cómo es posible entonces que esa fuerza origine una trayectoria con una curvatura tan pronunciada (el radio de la circunferencia es de varios centímetros).

La fuerza de Lorentz es ampliamente utilizada en los tubos de pantalla de los televisores y monitores de computadoras tradicionales. Mediante el campo magnético creado por unas bobinas especiales los electrones son dirigidos hacia diferentes puntos de la pantalla para formar las imágenes (Fig. 3.15). La fuerza de Lorentz también se emplea en los aceleradores de partículas subatómicas, para dirigir partículas con carga en la dirección deseada, y en otras muchas aplicaciones, como en los espectrógrafos de masas, los sensores para medir campo magnético basados en el efecto Hall, etc.



Fig. 3.15. En los tubos de pantalla de los televisores y monitores de computadoras tradicionales, los electrones son dirigidos hacia diferentes puntos de la pantalla por medio del campo magnético originado por unas bobinas especiales.

Indaga en Internet acerca de algunas aplicaciones del conocimiento acerca de la fuerza de Lorentz, como los aceleradores de partículas, el espectrógrafo de masas, etc.





Resume los dos factores que determinan el comportamiento de los átomos como diminutos imanes.



3.6. Materiales magnéticos y estructura interna.

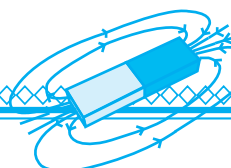
Todos los materiales colocados en un campo magnético exhiben propiedades magnéticas, o sea, originan un campo magnético por sí mismos. Pero en la mayoría de los casos estas propiedades se dan en tan pequeño grado que normalmente no son detectadas. Lo que en la vida cotidiana llamamos magnetismo es en realidad un tipo especial de él, que se manifiesta solo en una cantidad relativamente pequeña de materiales, denominados **ferromagnéticos**.

¿Cómo explicar el magnetismo que presentan los materiales, en particular el reforzamiento del campo magnético por los ferromagnéticos?

El origen de las propiedades magnéticas de los materiales está en el comportamiento de sus átomos y moléculas como diminutos imanes". Ya en su tiempo Ampere señaló que el origen del magnetismo de los cuerpos eran corrientes eléctricas que circulaban en su interior, de modo parecido a la corriente en una espira. Y en efecto, en uno de los modelos del átomo los electrones se mueven en torno al núcleo, dando lugar así a "corrientes" circulares. Adicionalmente, los electrones en sí mismos presentan un magnetismo intrínseco.

El estudio detallado de los distintos tipos de magnetismo es complejo. Por eso nos limitaremos a considerar algunos elementos relacionados con el **ferromagnetismo**, que es el tipo de magnetismo de mayor importancia práctica.

Entre los ferromagnéticos más usuales están el hierro, el cobalto, el níquel y ciertas aleaciones en que ellos intervienen. Tales materiales interactúan fuertemente con los imanes y de ellos se fabrican los imanes permanentes. También pueden ser ferromagnéticas algunas sustancias compuestas, como es el caso del óxido de hierro y el dióxido de cromo, componentes esenciales de muchas cintas y discos utilizados en grabadoras de sonido, equipos de video y computadoras. Un material ferromagnético muy utilizado son las **ferritas**. A diferencia del hierro o el acero, son muy malas conductoras de la electricidad, lo que las hace muy



útiles para determinadas aplicaciones. Se emplean en los núcleos de algunas bobinas y transformadores y en las antenas interiores de los radios.

No, pero sí he leído que el nombre de ese mineral, magnetita, y el propio término magnetismo, provienen del nombre de una ciudad de la antigua Grecia llamada Magnesia en la que había minas del mineral.

¿Sabías que la magnetita, mineral con propiedades magnéticas conocido desde la antigüedad, es una ferrita?

En los ferromagnéticos, muchos de los “diminutos imanes” que representan los átomos están acoplados y alineados entre sí, formando porciones llamadas **dominios** en las que el campo magnético se ve reforzado. Los dominios pueden llegar a tener hasta 0.01 mm de tamaño y también son pequeñísimos imanes. Normalmente están orientados al azar (Fig. 3.16a) y por eso sus acciones se compensan entre sí, lo cual explica que desde el punto de vista macroscópico el material normalmente no manifieste propiedades magnéticas.

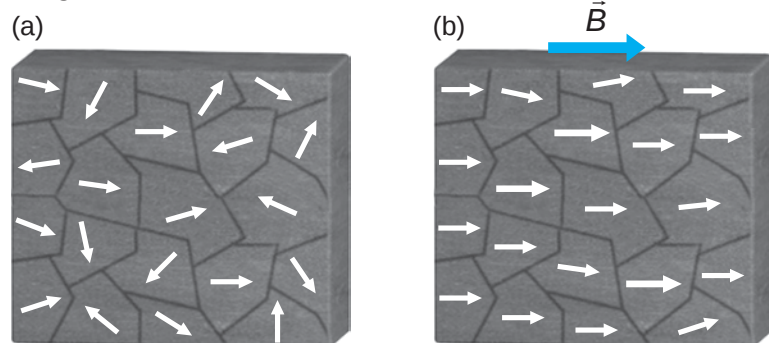


Fig. 3.16. Representación esquemática de los dominios en un material ferromagnético: (a) normalmente están orientados al azar. (b) al colocar el material en un campo magnético, los dominios que no están alineados según el campo tienden a alinearse y los alineados a crecer.

Cuando el material se coloca en un campo magnético, en unos dominios la orientación de los “imanes atómicos” no coincidirá con la dirección del campo y en otros sí. Ocurren entonces dos procesos: 1) en el interior de los dominios no alineados los “imanes atómicos” tienden a orientarse según el campo y 2) en los dominios alineados, parte de los





Explica con tus propias palabras el origen del reforzamiento del campo magnético producido por los materiales ferromagnéticos.



Explica con tus propias palabras por qué un imán atrae a un cuerpo ferroso.



“imanes atómicos” situados fuera de ellos se alinean con los de estos y se acoplan a ellos, haciendo que el tamaño de dichos dominios crezca (Fig. 3.16b). Ambos procesos conducen a que el valor del campo magnético en el interior del material ferromagnético sea mucho mayor que el del campo magnético externo que lo origina. Puede llegar a ser miles de veces mayor.

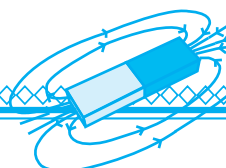
Por eso, introduciendo un núcleo ferromagnético en una bobina es posible reforzar en gran número de veces el campo magnético sin necesidad de aumentar la intensidad de la corriente, lo cual economiza energía eléctrica. Los ferromagnéticos se emplean en núcleos de electroimanes y transformadores, en los motores y generadores eléctricos, etc.

¿Cómo explicar el magnetismo que mantienen los ferromagnéticos aún después de desaparecer el campo externo, como es el caso de los imanes?

Cuando se suprime el campo magnético externo, los imanes atómicos que habían pasado a engrosar los **dominios** no retornan a sus posiciones anteriores, debido a lo cual el material mantiene cierta magnetización, denominada **magnetismo remanente**. Esto es lo que ocurre en los imanes permanentes.

La explicación microscópica del ferromagnetismo también permite comprender por qué un imán atrae a un cuerpo ferroso no magnetizado. Cuando el imán se aproxima al cuerpo, éste se magnetiza, originándose un polo sur en su lado que apunta al polo norte del imán y un polo norte en su lado opuesto.

Con la elevación de temperatura del material ferromagnético, aumenta la agitación térmica de sus átomos, por lo que puede romperse el acoplamiento entre sus “imanes atómicos” y, con ello, desaparecer su magnetización al suprimir el campo magnético externo. Para cada material ferromagnético esto ocurre a partir de determinada temperatura, denominada **temperatura de Curie**. Para el hierro, por ejemplo, esta es 770° C.



Explica desde el punto de vista microscópico, con tus propias palabras, el magnetismo remanente que presentan los materiales ferromagnéticos.



Indaga acerca de las vías para magnetizar un material ferromagnético. Ensayla la magnetización de objetos comunes.

3.7. Utilización práctica del efecto magnético de la corriente eléctrica.

En este apartado profundizaremos en algunas de las aplicaciones del efecto magnético de la corriente eléctrica: el motor eléctrico, la bocina electrodimámica y la grabación en materiales magnéticos.

3.7.1. Motor eléctrico de corriente directa.

Los motores eléctricos se utilizan en numerosos equipos. Muchos son de corriente alterna, como los de los habituales abanicos, lavadoras y bombas de agua; otros son de corriente directa, como los empleados en juguetes, grabadoras, equipos de video, dispositivos de CD/DVD, automóviles híbridos, motores de arranque de vehículos, etc. El funcionamiento de todos ellos se basa en la fuerza que experimenta un conductor con corriente en un campo magnético, es decir, en la fuerza de Ampere. Como ya sabes, dicha fuerza fue estudiada detalladamente por Ampere en 1820. Pocos años después, a principios de la década de 1830, ya se había inventado el primer motor eléctrico funcional. Estudiaremos solo el principio de funcionamiento de un modelo clásico de motor de corriente directa.

Menciona otros equipos, además de los relacionados en el texto, que utilicen motores eléctricos.



Verifica que el sentido de las fuerzas sobre las porciones 1 y 2 de la figura 3.17 es el correcto. ¿Qué efecto producen las fuerzas que actúan sobre sus porciones trasera y delantera?



Comenzaremos por examinar el “motor” más simple posible: una espira que puede rotar colocada en un campo magnético. En el esquema de la figura 3.17 la espira se ha situado entre los polos norte y sur de dos imanes y la corriente se suministra a través de unos anillos metálicos, que rozan unos carbones o escobillas.

Imaginemos que la espira inicialmente se encuentra en la posición de la figura 3.17a. Si se hace pasar una corriente eléctrica por ella, sobre cada una de sus porciones actúa la fuerza de Ampere, en cada caso perpendicularmente a la porción dada y a las líneas de campo. Utilizando la regla de la mano derecha puedes comprobar que sobre la porción 1 la fuerza está dirigida hacia arriba y sobre la 2 hacia abajo. Estas fuerzas provocan un momento de fuerzas neto que hace rotar a la espira.

Según la espira gira, el momento de las fuerzas disminuye, hasta hacerse cero al llegar a la posición de la figura 3.17b. No obstante, debido a su inercia, la espira sobrepasa esa posición. Pero una vez que la sobrepasa (Fig. 3.17c), como la fuerza sobre 1 es hacia arriba y sobre 2 hacia abajo, el momento neto de ellas tendrá sentido contrario, por lo que la espira va disminuyendo su velocidad de rotación, hasta que esta se hace cero. A partir de ese instante, invierte su sentido de rotación. El proceso se repite y el resultado es que la espira oscila alrededor de la posición de la figura

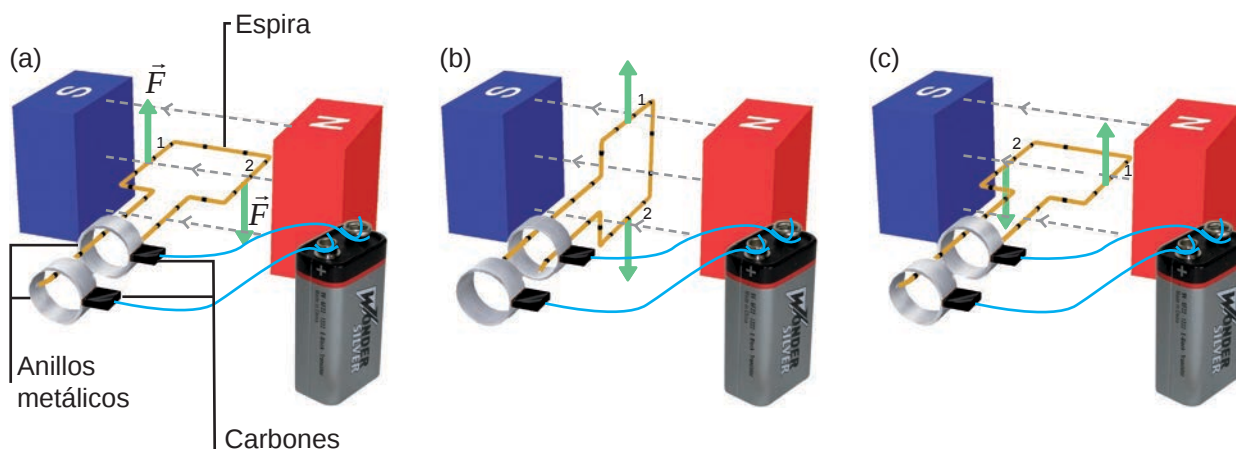
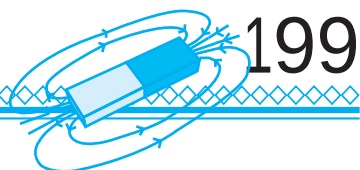


Fig. 3.17. Espira con corriente en un campo magnético: (a) el momento de fuerzas neto sobre la espira la hace rotar en el sentido de la manecillas del reloj, (b) el momento neto sobre la espira es nulo, pero continúa el movimiento debido a su inercia, (c) el momento neto tiende a hacer girar la espira en sentido contrario a las manecillas del reloj.



3.17b realiza oscilaciones. Debido al rozamiento en el eje, sus oscilaciones son cada vez de menor amplitud, y finalmente se detiene. ¿Cómo hacer para que la espira gire siempre en un mismo sentido?

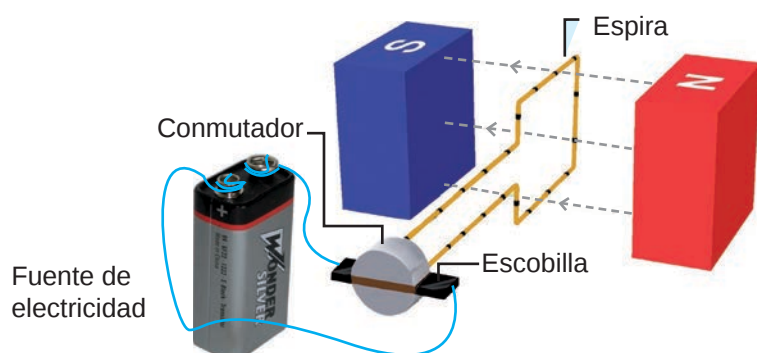


Fig. 3.18. El conmutador invierte periódicamente el sentido de la corriente y hace posible el giro de la espira siempre en un mismo sentido.

Argumenta por qué según la espira de la figura 3.17 gira de la posición que tiene en (a) a la que tiene en (b) el momento de fuerzas neto sobre ella disminuye.

Para ello se requiere invertir el sentido de la corriente una vez que sobrepase la posición de la figura 3.17b y volverlo a restituir cuando la porción 1 pase por su posición más baja y la 2 por la más alta. Lo anterior puede lograrse cambiando los anillos con que rozan los carbones por dos secciones semicilíndricas (Fig. 3.18). Este dispositivo se denomina **conmutador**.

Explica con tus propias palabras en qué consiste la función del conmutador en un motor eléctrico.



Por supuesto, un “motor” de una espira pudo haberse armado en un laboratorio en los años 1820, pero no tiene utilidad alguna. Fue necesario hacer mucho trabajo de ingeniería para llegar a disponer de motores realmente efectivos. En la figura 3.19 se muestra el esquema de un clásico motor de corriente directa. El alambre se enrolla en una pieza ferromagnética formando varias bobinas, cada una compuesta por gran número de espiras. El conmutador está compuesto de varias secciones. En la actualidad se fabrican motores cuyas potencias varían en un rango que

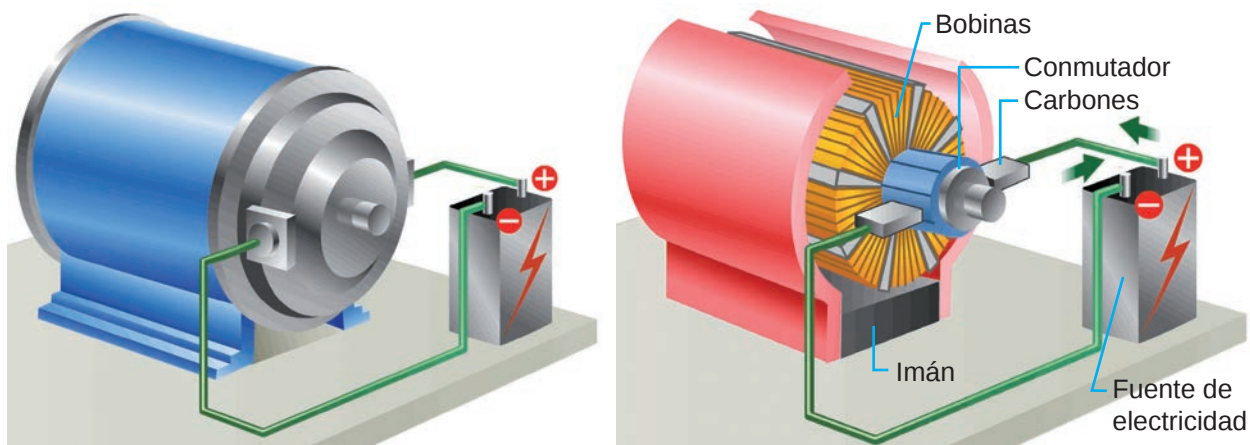
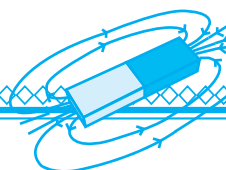


Fig. 3.19. Clásico motor de corriente directa. El alambre se enrolla en una pieza ferromagnética en forma de varias bobinas, cada una con gran número de espiras. El conmutador está compuesto de varias secciones.



abarca desde fracciones de watt, como los pequeños motores de algunos juguetes, hasta decenas de megawatt en los grandes motores. El conmutador mecánico del motor tiene una serie de inconvenientes, como la fricción entre él y los carbones o escobillas, el surgimiento de chispas, la necesidad de frecuente mantenimiento y otras. Actualmente esto puede ser solucionado empleando conmutadores electrónicos externos.

Examina algún pequeño motor de corriente directa, por ejemplo de un juguete, e identifica sus diferentes partes.



3.7.2. Bocina electrodinámica.

Entre los componentes esenciales de cualquier sistema de transmisión de sonido por medio de la electricidad, están el micrófono y la bocina (o los audífonos). Mientras que el primero transforma el sonido en oscilaciones de corriente eléctrica, que pueden transmitirse a través de cables (como en los teléfonos tradicionales) o mediante ondas electromagnéticas (como en los teléfonos celulares), las bocinas son las encargadas de realizar el proceso inverso, es decir de transformar las oscilaciones de corriente eléctrica en sonido.

Es posible utilizar diversos principios para transformar las oscilaciones de corriente en sonido, pero en la práctica el más empleado es el de la bocina electrodinámica.

La clásica bocina electrodinámica está básicamente formada por una bobina cilíndrica ligera, unida a un diafragma de papel, y situada en el orificio de un imán en forma de anillo (Fig. 3.19). El diafragma de papel queda sostenido por algún material elástico, que le permite oscilar junto con la bobina.

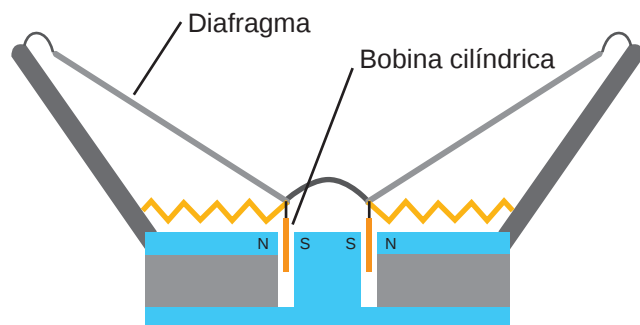


Fig. 3.19. Esquema de una bocina electrodinámica. Bajo la acción de la fuerza de Ampere, la bobina y el diafragma oscilan según las oscilaciones de la intensidad de la corriente.



Traza un esquema que resuma las transformaciones de energía que tienen lugar desde que se habla frente a un micrófono, hasta que el sonido se escucha mediante un altavoz o unos audífonos.



Las espiras de la bobina quedan así situadas en el campo magnético de un imán circular. Cuando por la bobina se hace pasar, por ejemplo, la corriente (amplificada) procedente de un micrófono, entonces sobre cada una de las porciones de sus espiras actúa la fuerza de Ampere. La bobina oscila de acuerdo con las oscilaciones de la intensidad de corriente, haciendo vibrar al diafragma y produciendo el sonido.

En el esquema de la figura 3.19, Determina las direcciones de las líneas de campo magnético, la corriente eléctrica y la fuerza de Ampere.

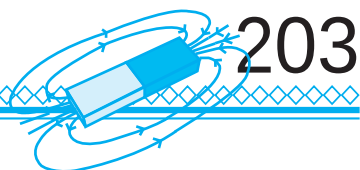
El principio de funcionamiento de los audífonos es similar al de la bocina. Un pequeño electroimán por el que fluye una corriente que oscila, actúa sobre un diafragma, haciéndolo vibrar.

3.7.3. Grabación magnética.

La superficie de cintas y discos de grabación magnética (Fig.3.21) está impregnada de partículas ferromagnéticas en forma de aguja, que pueden ser miles de veces menores que un milímetro. Tales partículas constituyen diminutos imanes. En una pequeña porción de cinta no grabada, aproximadamente la mitad de estos pequeños imanes está orientada en una dirección y la otra mitad en la dirección opuesta.



Fig. 3.21. Las superficies de grabación de cintas de sonido, así como de discos flexibles y discos duros de computadoras, están impregnadas de diminutas partículas ferromagnéticas.



El cabezal empleado en la grabación magnética es un pequeño electroimán, cuyo campo magnético varía según la información que en forma de corriente eléctrica llega a él. El electroimán actúa sobre una diminuta área de las cintas o discos, en la cual hay miles de partículas magnéticas.

En las cintas de sonido, dicha área puede tener 0.0025 mm de ancho. Durante la grabación habitual de sonido, el porcentaje de partículas magnéticas que se orienta en una u otra dirección varía a lo largo de la cinta, en dependencia de las características del sonido. Para el borrado, la cinta se somete a un campo magnético alterno de elevada frecuencia, lo cual hace que, de nuevo, aproximadamente la mitad de las partículas queden orientadas en una dirección y la otra mitad en dirección contraria.

La grabación magnética digital, utilizada por ejemplo en las computadoras, también se basa en la orientación en una pequeñísima área de las partículas magnéticas en una u otra dirección. Pero como la información digital se presenta mediante un código de dos posibilidades (unos y ceros), no es un porcentaje de partículas lo que se orienta en cierta dirección, simplemente, todas las de un área dada se orientan en una dirección determinada, o en la contraria.





3.8. Actividades de sistematización y consolidación.

3.8.1. Sopa de letras.

Escribe cada palabra en Wikipedia o en Encarta y da un vistazo a lo que encuentres.

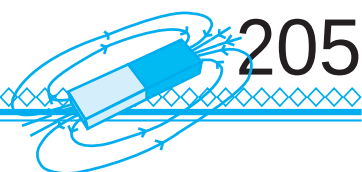
A	N	T	Z	W	S	O	I	N	I	M	O	D	Q	B	Q	H	A
D	N	Í	H	U	S	J	Ü	U	O	N	O	F	Ó	R	C	I	M
A	T	I	T	E	N	G	A	M	G	N	G	O	C	Ú	K	A	T
K	Z	C	B	N	I	O	Ü	E	R	R	M	Ó	Y	J	I	T	L
X	Z	O	Y	O	W	C	Á	Ó	S	S	H	O	K	U	J	I	K
P	U	N	L	N	B	I	R	N	I	C	S	É	B	L	D	R	C
Y	Ñ	M	M	O	T	T	V	T	N	H	O	P	O	A	É	R	H
L	G	U	O	I	P	É	E	C	Á	C	H	B	C	W	K	E	C
O	C	T	T	J	R	N	Y	V	M	H	Ü	E	I	A	M	F	V
R	A	A	O	K	G	G	Ü	M	I	A	T	Ñ	N	L	D	G	E
E	B	D	R	A	O	A	G	D	O	R	Q	F	A	Ú	L	U	D
N	E	O	M	Í	N	M	W	E	R	I	T	A	O	D	K	A	I
T	Z	R	T	S	O	O	G	R	T	P	R	R	E	S	U	R	O
Z	A	É	E	Q	F	R	R	E	C	S	Í	A	R	A	I	U	N
Í	L	A	S	Ü	Í	R	Y	P	E	E	Ü	D	S	V	M	Á	E
I	A	Ó	L	A	D	E	A	M	L	K	Z	A	T	L	Á	Ú	L
T	E	C	A	I	U	F	B	A	E	G	Z	Y	E	Á	N	M	O
Ü	V	O	P	M	A	C	H	Á	E	S	K	D	D	H	B	T	S

Magnetismo
Imán
Brújula
Polo
Campo
Bobina
Solenoides
Ferromagnético
Electroimán
Oersted

Faraday
Ampere
Tesla
Lorentz
Ferrita
Magnetita
Dominio
Motor
Espira
Conmutador

Escobilla
Bocina
Micrófono
Audífono
Cabezal



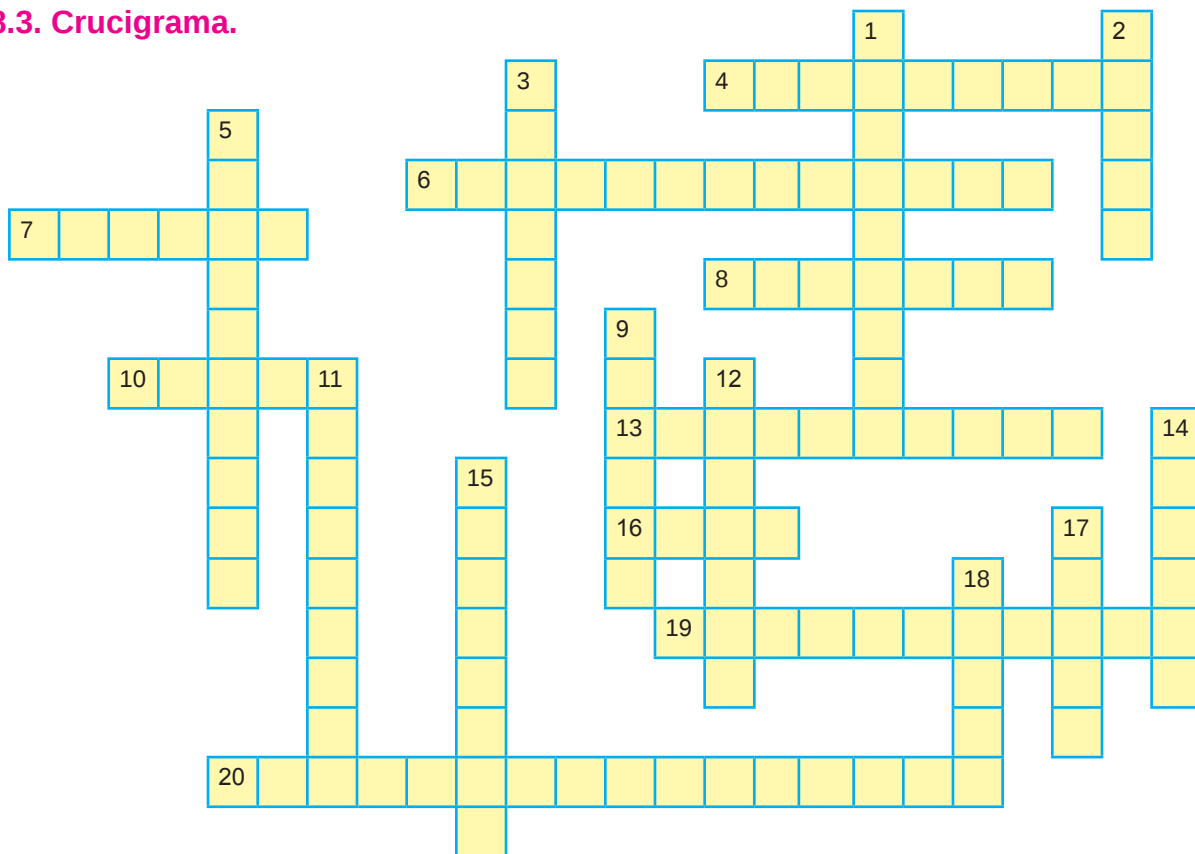


3.8.2. Conexión de conceptos e ideas.

- | | | |
|--|---|---|
| 1. Lugar hacia donde apunta el polo norte de la aguja de una brújula. | (|) Campo magnético. |
| 2. Intermediario a través del cual se transmite la interacción magnética. | (|) Carga eléctrica de la partícula, vector campo magnético, velocidad de la partícula, ángulo entre el vector campo magnético y la velocidad. |
| 3. Recurso visual utilizado para caracterizar el campo magnético. | | |
| 4. Magnitud que caracteriza al campo magnético. | (|) Experimento de Oersted. |
| 5. Dirección del vector campo magnético. | (|) Ferromagnético. |
| 6. Sentido del vector campo magnético indicado por una aguja magnética. | (|) Fuerza de Ampere. |
| 7. Nombre del experimento que por primera vez puso de manifiesto que existe relación entre corriente eléctrica y magnetismo. | (|) Fuerza de Ampere sobre las porciones de las espiras de la bobina. |
| 8. Nombre que recibe la fuerza que actúa sobre un conductor con corriente situado en un campo magnético. | (|) Fuerza de Lorentz. |
| 9. Dirección de la fuerza de Ampere. | (|) Líneas de campo. |
| 10. Magnitudes de las que depende la fuerza de Ampere. | (|) Momento de fuerza. |
| 11. Nombre que recibe la fuerza que actúa sobre una partícula cargada en movimiento debido a un campo magnético. | (|) Movimiento de electrones en torno a los núcleos atómicos y magnetismo intrínseco de los electrones. |
| 12. Dirección de la fuerza de Lorentz. | (|) Orientación de los dominios al azar. |
| 13. Magnitudes de las que depende la fuerza de Lorentz. | (|) Orientación de unos dominios y crecimiento de otros. |
| 14. Tipo de material en cuyo interior se origina un campo magnético mucho mayor que el externo en el cual se coloca. | (|) Orientación por medio de un electroimán de diminutas partículas ferromagnéticas de las que están impregnados. |
| 15. Origen del comportamiento de los átomos como diminutos imanes. | (|) Perpendicular a las líneas de campo y al conductor. |
| 16. Razón por la cual, pese al comportamiento de los átomos o moléculas de muchas sustancias como diminutos imanes, la mayoría no presenta magnetismo espontáneamente. | (|) Perpendicular al vector campo magnético y a la velocidad de la partícula. |
| 17. Razón por la cual, al colocar un material ferromagnético en un campo magnético, el campo en su interior se hace mucho mayor. | (|) Polo sur magnético. |
| 18. Nombre de la magnitud que origina el giro de un motor eléctrico. | (|) Sur-norte. |
| 19. Principio físico básico del funcionamiento de una bocina electrodinámica. | (|) Tangente a las líneas de campo en cada uno de sus puntos. |
| 20. Principio físico básico de la grabación magnética en cintas y discos. | (|) Vector campo magnético. |
| | (|) Vector campo magnético, intensidad de corriente, longitud de la porción de conductor, ángulo entre la porción de conductor y las líneas de campo. |



3.8.3. Crucigrama.

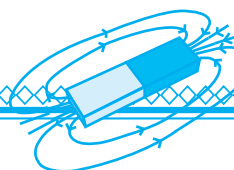


Horizontales

4. Bobina de forma cilíndrica y alargada.
6. Dirección de la fuerza de Ampere respecto al vector campo magnético y al conductor con corriente.
7. Dispositivo eléctrico utilizado para transformar las oscilaciones de corriente en sonido.
8. Apellido del científico que por primera mostró que hay una relación entre la corriente eléctrica y el magnetismo.
10. Dispositivo eléctrico cuyo principio de funcionamiento físico básico consiste en la acción de una fuerza sobre conductores situados en un campo magnético.
13. Se dice de un imán que, a diferencia de un electroimán, no necesita corriente eléctrica para mantener sus propiedades magnéticas.
16. Color del que a veces se pinta el polo norte de los imanes y agujas magnéticas.
19. Bobina con núcleo de hierro.
20. Materiales que al ser introducidos en un campo magnético lo refuerzan en un gran número de veces.

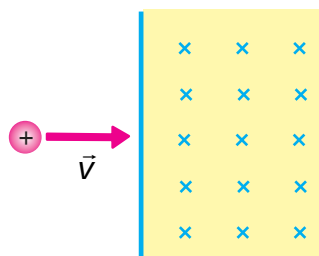
Verticales

1. Tipo de fuerza entre los polos del mismo tipo de dos imanes.
2. Nombre especial que recibe la unidad básica de campo magnético en el sistema internacional de unidades.
3. Apellido del científico de quien toma nombre la fuerza que actúa sobre partículas cargadas en movimiento debido a un campo magnético.
5. Nombre del dispositivo utilizado en los motores eléctricos para variar el sentido de la corriente en las bobinas que lo forman.
9. Apellido del científico que estudió detalladamente las magnitudes de que depende la fuerza ejercida sobre un conductor con corriente eléctrica situado en un campo magnético.
11. Calificativo que recibe el magnetismo que presentan los materiales ferromagnéticos aún después de haber suprimido el campo magnético externo.
12. Dispositivo con una aguja que se orienta en el campo magnético de la Tierra.
14. Alambre enrollado en forma de una serie de espiras.
15. Nombre que reciben ciertas porciones de los materiales ferromagnéticos, en las cuales los diminutos imanes que representan los átomos están acoplados y alineados entre sí.
17. Intermediario que transmite la interacción magnética.
18. Regiones de los imanes que actúan con mayor intensidad sobre otros imanes o cuerpos ferrosos.

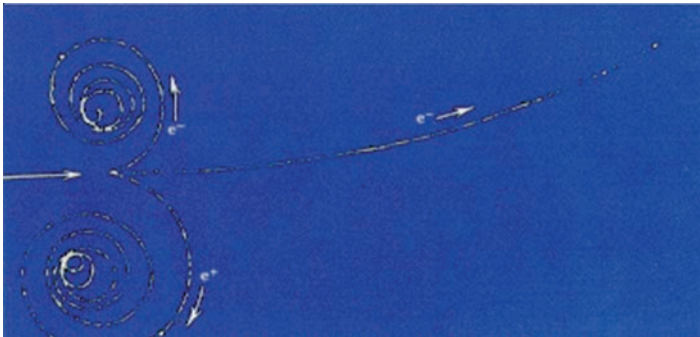


3.8.4. Actividades de repaso.

1. Comenzando con el término magnetismo, confecciona un diagrama que conecte conceptos e ideas como los siguientes: imanes, campo magnético, corriente eléctrica, fuerza de Ampere, fuerza de Lorentz, ferromagnetismo, aplicaciones.
2. Intenta responder, resumidamente, las siguientes preguntas formuladas al inicio de la unidad: ¿Cuáles son las características de la acción magnética de los imanes? ¿Cómo se transmite la interacción magnética? ¿Qué relación tiene el magnetismo con la corriente eléctrica? ¿Cómo se explican desde el punto de vista microscópico las propiedades de los materiales ferromagnéticos? ¿Cuáles son algunas de las aplicaciones del efecto magnético de la corriente eléctrica?
3. Explica e ilustra mediante ejemplos las características básicas de: a) los imanes, b) el campo magnético, c) la fuerza de Ampere, d) la fuerza de Lorentz, e) los materiales ferromagnéticos.
4. En la mayoría de los lugares, uno de los extremos de la aguja de una brújula se inclina algo hacia abajo y el otro extremo hacia arriba. Explica por qué.
5. Un conductor con corriente se ha colocado en un campo magnético uniforme y no experimenta fuerza debida al campo. Explica.
6. ¿Por qué en el experimento de la figura 3.9, la fuerza de Ampere que actúa sobre los alambres de que cuelga el conductor no influye en equilibrio de la balanza?
7. ¿Puede un campo magnético constante poner en movimiento a una partícula cargada que está inicialmente en reposo? Argumenta tu respuesta.
8. ¿Puede moverse una partícula cargada en un campo magnético sin que actúe fuerza magnética sobre ella? Argumenta tu respuesta.
9. ¿Por qué si se acerca un imán a un televisor tradicional, la imagen se distorsiona? (No vayas a realizar la experiencia, pues podrías dañar el televisor).
10. El esquema muestra un protón que penetra en una región de campo magnético uniforme, perpendicularmente a las líneas de campo. ¿Cómo será el movimiento posterior del protón? ¿Cómo sería si la partícula fuese un electrón?





11. ¿Qué sucedería con el radio de la circunferencia de la foto del ejemplo 3.6, si la velocidad de los electrones fuese mayor? Argumenta tu respuesta.
 12. El esquema muestra las trayectorias de dos electrones y un positrón (partícula de igual masa e igual valor de carga eléctrica que el electrón, pero positiva) que se mueven en un campo magnético uniforme que es perpendicular al plano de la figura. ¿A qué se deberá que las trayectorias son espirales y no circunferencias?
- 
13. Explica desde el punto de vista microscópico, por qué la magnetización y la desmagnetización se facilitan al golpear los cuerpos.
 14. Explica el principio básico de funcionamiento de: a) el motor eléctrico de corriente directa, b) la bocina electrodinámica, c) la grabación magnética en cintas y discos.

3.8.5. Ejercicios de repaso.

1. Un conductor de 2.0 cm de longitud por el que pasa una corriente de 2.0 A se colocó en un campo magnético uniforme perpendicularmente a las líneas de campo. Se midió la fuerza que actúa sobre él y se encontró que era 0.080 N ¿Cuál era el valor del campo magnético?

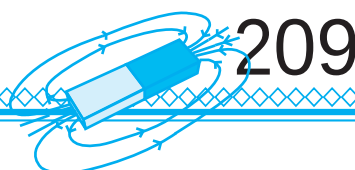
Respuesta: 2.0 T

2. Considera una región de la superficie de la Tierra en que el campo magnético es de 4.2×10^{-5} T. Si un conductor de 10.0 m de longitud por el que pasa una corriente de 15 A se coloca perpendicularmente a las líneas de campo, ¿cuál es el valor de la fuerza de Ampere que actúa sobre el conductor?

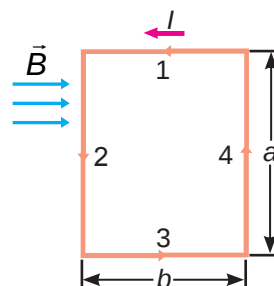
Respuesta: 6.3×10^{-3} N

3. Una porción de alambre de 20.0 cm de longitud está situada en un campo magnético uniforme de 0.50 T. Por el alambre pasa una corriente de 5.0 A. Calcula la fuerza de Ampere si el ángulo entre el vector campo magnético y la porción de alambre es 30° .

Respuesta: 0.25 N



4. En la figura se ha representado una espira rectangular con corriente situada en un campo magnético uniforme.
- ¿Sobre cuáles de sus porciones se ejercen fuerzas?
 - ¿Qué fuerza neta actúa sobre la espira?
 - ¿Tiende a moverse la espira? Argumenta tus respuestas.



Respuesta: a) 2 y 4, b) cero, c) Si, a girar.

5. Un conductor de masa 5.0 g y longitud 20 cm está suspendido horizontalmente mediante dos alambres flexibles y situado en un campo magnético uniforme de 1.0 T. La dirección del conductor es Norte-Sur y el sentido del vector campo magnético Oeste-Este. ¿Cuál debería ser la intensidad de corriente en el conductor para que la tensión en los alambres de los que cuelga fuese nula? ¿Qué sentido debe tener la corriente?

Respuesta: 4.1 A, N-S

6. Un conductor de masa 10 g y longitud 10.0 cm se colgó horizontalmente de dos alambres y se situó entre los polos de un imán. El campo magnético del imán era de 9.8×10^{-2} T, dirigido horizontalmente y perpendicular al conductor. Al hacer pasar una corriente por el conductor, los alambres de que cuelga se desviaron 30° de la vertical. ¿Cuál era la intensidad de corriente? Desprecia la masa de los alambres de los que cuelga el conductor.

Respuesta: 10 A

7. Por un solenoide de 600 espiras y 15 cm de longitud se hace pasar una corriente de 1.0 A. a) ¿Cuál es el valor del campo magnético en su interior? b) Si en el interior del solenoide se coloca un conductor de 2.0 cm de longitud perpendicularmente a las líneas de campo y se hace pasar por él una corriente de 2.0 A, ¿qué fuerza actúa sobre el conductor?

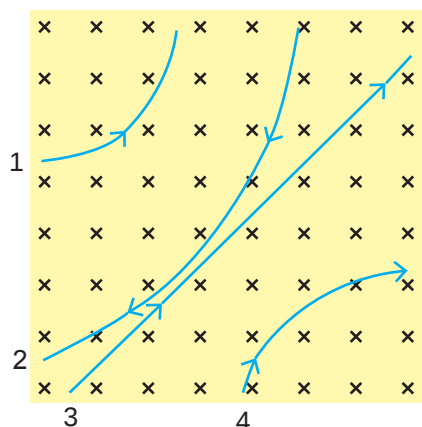
Respuesta: a) 5.0×10^{-3} T, b) 2.0×10^{-3} N

8. En un lugar que la componente horizontal del campo magnético de la Tierra es de 2.0×10^{-5} T se produce un campo magnético uniforme de ese mismo valor, horizontal, perpendicular al campo de la Tierra y dirigido de oeste a este. ¿En qué dirección se orientará la aguja magnética de una brújula colocada en ese lugar?

Respuesta: En una dirección 45° hacia abajo de la dirección oeste-este



9. El esquema de la figura muestra las trayectorias de cuatro partículas que se mueven en un campo magnético uniforme. ¿Qué puede decirse acerca de las cargas eléctricas de las partículas? Argumenta tu respuesta.



Respuesta: 1, positiva; 2, negativa; 3, sin carga; 4 negativa.

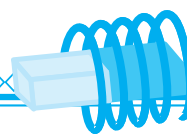
10. En un lugar de la Tierra donde su campo magnético es horizontal y de $3.0 \times 10^{-5} \text{ T}$, un electrón se mueve a $6.0 \times 10^6 \text{ m/s}$, también horizontalmente, en dirección perpendicular al campo magnético de la Tierra, de este a oeste. Determina: a) la fuerza magnética que actúa sobre el electrón (magnitud, dirección y sentido), b) la fuerza eléctrica ($E_T = 150 \text{ N/C}$), c) la fuerza de gravedad, d) compara los valores de dichas fuerzas. La carga del electrón es $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ y su masa $9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$..

Respuesta: a) $2.9 \times 10^{-17} \text{ N}$ verticalmente hacia abajo, b) $2.4 \times 10^{-17} \text{ N}$ verticalmente hacia arriba, c) $8.9 \times 10^{-30} \text{ N}$ verticalmente hacia abajo.

4

Inducción electromagnética





Entre los efectos producidos por una corriente eléctrica se encuentran los **térmicos**, **luminosos**, **químicos** y **magnéticos**. Recíprocamente, los cambios **térmicos**, la radiación **luminosa** y las reacciones **químicas** pueden originar corriente eléctrica, como en los casos de termopares, pilas y acumuladores, y paneles solares. Esta reciprocidad observada en la relación entre unos tipos de fenómenos y otros, y el hecho de que, como hemos estado estudiando, una corriente eléctrica origine magnetismo, sugieren la pregunta: ¿y no será posible obtener corriente eléctrica a partir de magnetismo?

Averigua en una enciclopedia o en Internet, qué es un termopar.

Haz un esquema que muestre las relaciones recíprocas entre los cambios o fenómenos mencionados en el texto.

Al parecer, la idea de las transformaciones recíprocas entre fenómenos de distinta naturaleza condujo a Michael Faraday a una pregunta similar a la anterior. En el año 1823 escribió la siguiente anotación en su diario: “Transformar el magnetismo en electricidad”. Y ocho años después encontró la solución. De esta solución y de la repercusión que tuvo en la tecnología y la propia ciencia trataremos en este capítulo. Examinaremos cuestiones clave como las siguientes:

*¿Cómo obtener corriente eléctrica a partir del magnetismo?
¿Cuáles son algunos de los desarrollos tecnológicos más relevantes que hizo posible el estudio de este fenómeno?
¿En qué consiste una onda electromagnética?*

4.1. Experiencias de inducción electromagnética.

¿Cómo obtener corriente eléctrica a partir del magnetismo?

A continuación describimos, resumidamente, una serie de tres experimentos realizados por Michael Faraday en el transcurso de mes y medio en el año 1831. Ellos dan respuesta a la pregunta formulada.

Experimento 1. Como conoces, un cuerpo electrizado situado próximo a otro puede hacer que una parte de este





se cargue positivamente y la otra negativamente. De modo similar, un imán situado cerca de un cuerpo de hierro da lugar a un polo norte en una parte de él y a un polo sur en la opuesta. En otras palabras, un cuerpo cargado puede originar carga en otro y un imán originar otro imán. En la época de Faraday, a estos fenómenos se les daba el nombre de **inducción**.

Busca en un diccionario el significado de la palabra "inducción".

Tal vez por analogía con los fenómenos de inducción electrostática e inducción magnética, Faraday comenzó por preguntarse: ¿podrá una bobina con corriente, inducir corriente en otra colocada próxima a ella?

A fin de responder esta pregunta, preparó dos bobinas, una enrollada entre la otra. Generó una corriente en una de ellas empleando una pila de Volta compuesta por 100 elementos, e intentó detectar corriente en la otra, por medio de una especie de amperímetro. En la figura. 4.1 se ilustra una variante moderna de este experimento. Después de múltiples esfuerzos, el 29 de agosto de 1831 halló que cuando cerraba o abría el circuito de la primera bobina, se producía una corriente momentánea en la otra. En sus ensayos, Faraday encontró que **una corriente constante no induce corriente, solo lo hace una corriente variable**.

¿Para qué se introducirá un núcleo de hierro en las bobinas en el experimento de la figura 4.1?

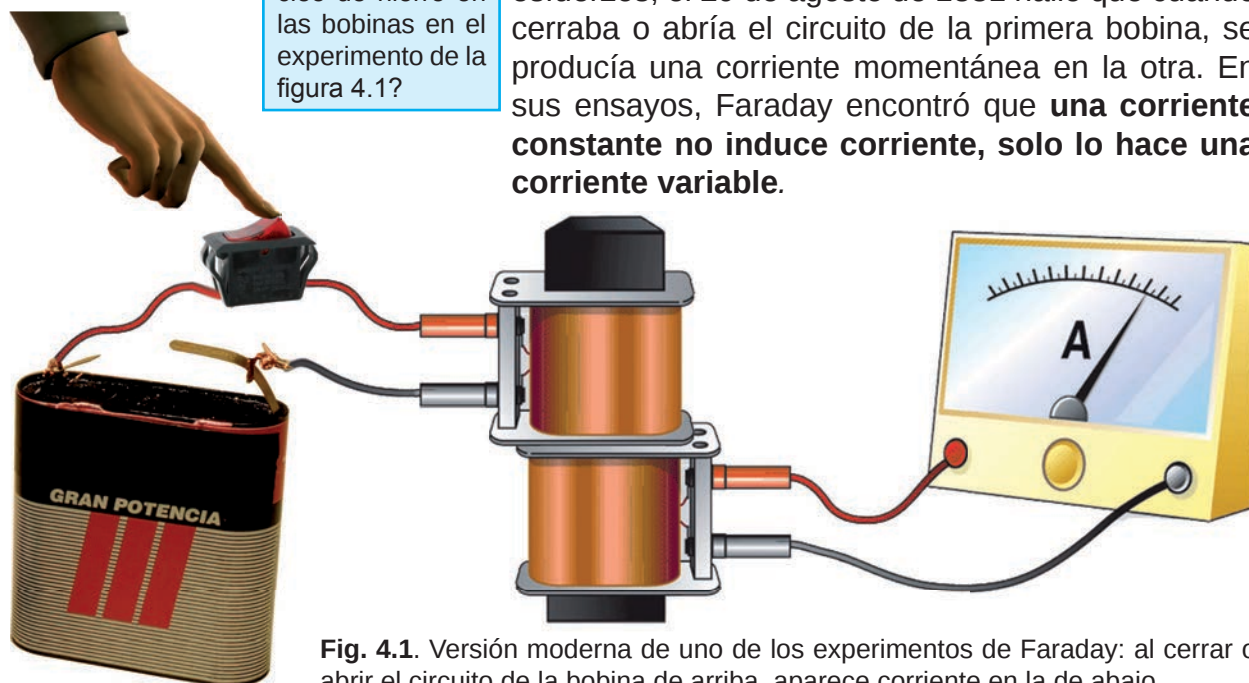
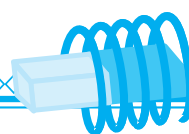


Fig. 4.1. Versión moderna de uno de los experimentos de Faraday: al cerrar o abrir el circuito de la bobina de arriba, aparece corriente en la de abajo.



Experimento 2. Luego de su descubrimiento inicial, Faraday supuso que **al acercar o alejar entre sí dos bobinas, por una de las cuales fluye corriente eléctrica, se induciría una corriente en la otra**, y comprobó esta idea en la práctica. La figura 4.2 muestra una versión actual de este experimento.

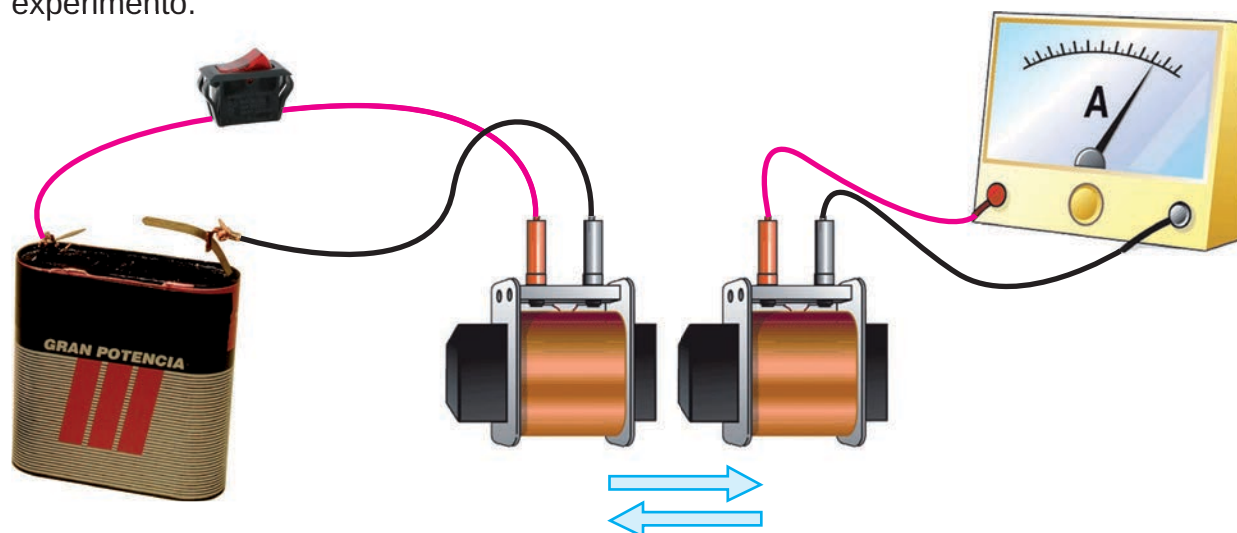


Fig. 4.2. Si por la bobina de la izquierda está pasando corriente eléctrica, entonces al acercar o alejar entre sí las bobinas aparece una corriente en la de la derecha.

¿En qué pudo haberse basado Faraday, para suponer que al acercar o alejar entre sí dos bobinas se produciría el mismo efecto que al cerrar o abrir el interruptor en su experimento inicial?

Experimento 3. Alrededor de mes y medio después de su primer descubrimiento, Faraday encontró que también **al acercar o alejar entre sí un imán y una bobina se induce corriente en la bobina**. En la figura 4.3 se muestra el esquema del experimento.



Fig. 4.3. Al acercar o alejar entre sí un imán y una bobina, se induce una corriente en ésta. Lo esencial es variar la “cantidad de campo magnético” que atraviesa la espira.

¿Por qué después de haber realizado los experimentos con bobinas, era de esperar que al acercar o alejar entre sí un imán y una bobina también se induciría corriente?

Presta atención a que en los experimentos 2 y 3 es indiferente qué cuerpo es el que se mueve, la bobina en la que se induce corriente, o los cuerpos magnetizados, lo importante es que haya **movimiento relativo entre ellos**.

Entonces en el experimento de la figura 4.3, ¿da igual que la bobina esté en reposo y el imán en movimiento, que a la inversa?

Sí, recuerda que considerar a un cuerpo en reposo o movimiento es una cuestión relativa, depende del cuerpo que tomamos como referencia. Al fenómeno que ocurre en ese experimento le son indiferentes nuestras referencias. La profunda reflexión sobre esto llevó a Einstein a desarrollar la teoría especial de la relatividad.

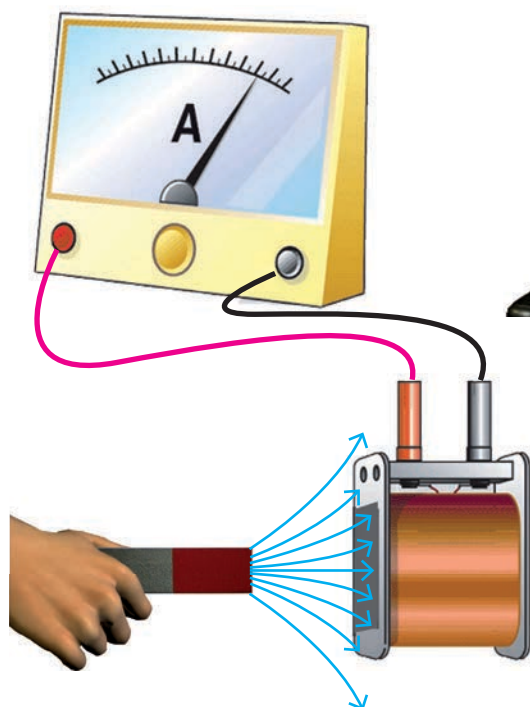
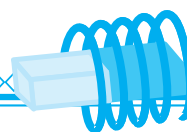


Fig. 4.4. Al acercar o alejar entre sí un imán y una bobina, varía la cantidad de líneas de campo que la atraviesa.



Observa que los tres experimentos descritos tienen en común que varía la “cantidad de campo magnético” que atraviesa las bobinas. El recurso de las líneas de campo ilustra qué queremos decir con esto. Así, por ejemplo, es evidente que al acercar o alejar entre sí un imán y una bobina (Fig. 4.4), varía la cantidad de líneas de campo que la atraviesa. De este modo:

Para inducir corriente eléctrica en una bobina lo esencial es variar la “cantidad de campo magnético” que la atraviesa, inde-



pendientemente de la vía utilizada para ello: abrir o cerrar el circuito de otra bobina próxima a ella, acercar o alejar entre sí dos bobinas con corriente, acercar o alejar entre sí un imán y una bobina.

Es obvio que en el experimento de la figura 4.1 varía la cantidad de campo magnético que atraviesa la bobina inferior: inicialmente no hay campo y luego, al cerrar el circuito de la bobina de arriba, éste aparece.

En principio, los experimentos anteriores pueden ser realizados utilizando una sola espira en lugar de una bobina, pero en tal caso la corriente inducida es muy pequeña y por tanto más difícil de registrar. La bobina multiplica el efecto según el número de espiras de que consta.

La inducción de una corriente eléctrica en una bobina (o en una espira) mediante la variación de la “cantidad de campo magnético” que la atraviesa se conoce como fenómeno de **inducción electromagnética**.

Ah!, el término inducción electro-magnética seguramente proviene de que se induce electricidad a partir de magnetismo.

Nota que **la espira en la que aparece una corriente inducida se comporta como si por un breve tiempo estuviera conectada a una fuente de fem**. Por eso es usual decir que se induce una fem en ella.

Revisa en el capítulo 2 a qué se denomina “fuente de fem”.

Los experimentos con bobinas e imanes también muestran que al aumentar la rapidez del movimiento relativo entre las bobinas o entre el imán y la bobina, aumenta la intensidad de la corriente inducida. De este modo:

Mientras mayor sea la rapidez con que varía la “cantidad de campo magnético” que atraviesa una espira, mayores serán la fem y la intensidad de la corriente inducidas.





Las líneas de campo dan una idea cualitativa de cómo varía “la cantidad de campo magnético” que atraviesa una espira, ¿pero no hay manera de hacer esto cuantitativamente?



Sí, en el próximo apartado veremos cómo, y también cómo expresar mediante una fórmula los resultados descritos en esta sección.

4.2. Ley de la inducción electromagnética.

En el apartado anterior hemos respondido solo cualitativamente a la pregunta *¿cómo obtener corriente eléctrica a partir del magnetismo?*, ahora veremos cómo expresar los resultados obtenidos mediante una fórmula. Comenzaremos introduciendo una magnitud que caracteriza a “la cantidad de campo magnético” que atraviesa determinada superficie, para lo cual nos auxiliaremos de la representación del campo por medio de líneas.

4.2.1. Flujo de campo magnético.

Como sabes, las líneas de campo se trazan de modo que su concentración sea proporcional a la magnitud del campo. Así, si se tiene una región en que su magnitud es dos veces mayor que en otra (Fig. 4.5), entonces en la primera las líneas de campo se representan de modo que la concentración de ellas sea doble.

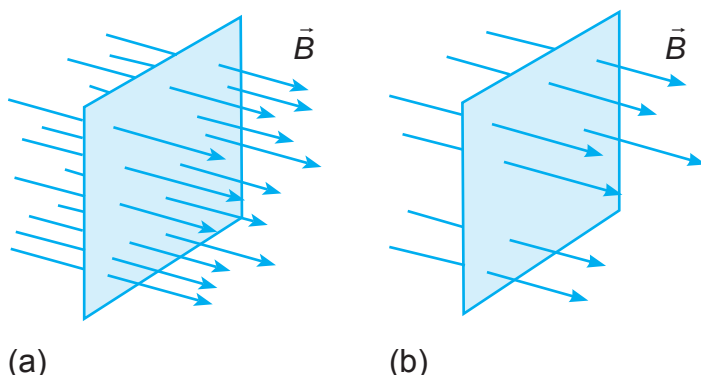
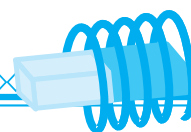


Fig. 4.5. En (a) la magnitud del campo magnético es dos veces mayor que en (b) y por eso el número de líneas de campo representadas es doble.

Consideremos una región en la que el campo magnético puede asumirse uniforme y una superficie de área A **perpendicular a las líneas de campo**, como en los casos de la Fig. 4.5. Si n es la concentración de las líneas de campo que atraviesan la superficie, es decir, su número por unidad de área, entonces la cantidad total de ellas es:

$$N = nA.$$

Esta fórmula está escrita en términos de líneas de campo, las cuales, como sabes, son solo un recurso visual. Sin embargo, sugiere cómo medir la “cantidad de campo magnético” que atraviesa la superficie.

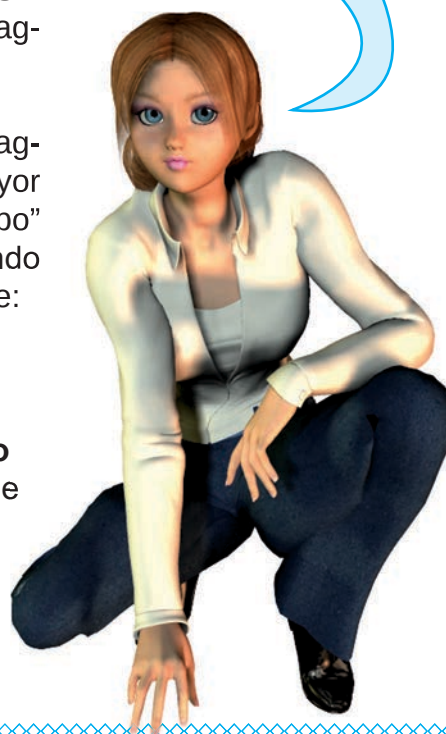
En efecto, la concentración n de líneas representa la magnitud B del campo (a mayor concentración de líneas mayor campo) y el número total de ellas N , la “cantidad de campo” que atraviesa la superficie completa. Por eso, sustituyendo N por la “cantidad de campo” y n por B , puede escribirse:

$$\text{“Cantidad de campo magnético”} = BA$$

Esta magnitud se denomina **flujo de campo magnético** y se designa por la letra Φ (letra griega fi mayúscula). De modo que:

$$\Phi = BA$$

Ah, el término “flujo” de campo seguramente tiene su origen cuando las líneas se dibujan atravesando una superficie, parece como si algo fluyera a través de ella.





(a)



(b)

Fig. 4.6. Esquema en 3 D una espira colocada en un campo magnético uniforme de modo que su superficie es: a) perpendicular a las líneas de campo, b) forma otro ángulo con las líneas de campo. En (b) el flujo de campo es menor que en (a).

Cabe señalar que esta fórmula solo es válida cuando la superficie considerada es perpendicular a las líneas de campo magnético. Si forma otro ángulo con las líneas de campo, entonces el flujo es menor que el producto BA . Esto puedes entenderlo con ayuda de la figura 4.6, la cual muestra una vista transversal de una misma lámina colocada en un campo magnético uniforme en dos casos: (a) perpendicularmente a las líneas de campo, (b) formando otro ángulo con la líneas. Obseva que el número de líneas que atraviesa la lámina en (b) es menor que en (a), por lo que el flujo de campo también es menor.

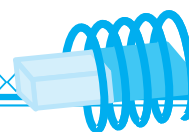
¿Lo anterior significa que si cierta superficie es paralela a las líneas de campo, entonces el flujo de campo es cero?

En efecto, en ese caso ninguna línea de campo atravesaría la superficie.



Ahora, empleando el concepto de flujo de campo magnético, puede decirse que:

Para inducir corriente eléctrica en una bobina lo esencial es variar el flujo de campo magnético que la atraviesa.



Si, lo esencial para inducir una corriente eléctrica en una espira es variar el flujo de campo magnético que la atraviesa, ¿entonces ello pudiera también lograrse haciendo girar la espira!



Efectivamente, y además variando el área de ella que es atravesada por las líneas de campo. Como ves, hay muchas formas de variar el flujo que atraviesa una espira y, por tanto, de inducir corriente eléctrica en ella. A propósito, el giro de espiras es la base de los generadores inducción, de los cuales proviene prácticamente toda la energía eléctrica que empleamos.

4.2.2. Ley de Faraday de la inducción electromagnética.

Utilizando los conceptos de **flujo de campo magnético** y **fem**, pueden expresarse los resultados obtenidos cuantitativamente. Es lo que se conoce como **ley de Faraday de la inducción electromagnética**:

La fem inducida en una espira es directamente proporcional a la rapidez con que varía el flujo de campo magnético a través de la espira.

Y mediante una fórmula:

$$\varepsilon = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Cuando el campo magnético se expresa en **tesla**, como hemos hecho nosotros, la constante de proporcionalidad entre ε y $\Delta \Phi / \Delta t$ es uno.



Observa que no es la intensidad de corriente la que interviene en la ley, sino la fem. Ello explica el efecto multiplicador de una bobina respecto al de una espira. Al variar el flujo de campo magnético que atraviesa la bobina, se induce una fem en cada una de sus espiras. Normalmente esta fem es muy pequeña, pero las espiras se comportan como un gran número de fuentes de fem conectadas en serie, lo que da por resultado una fem apreciable en los terminales de la bobina.

El signo menos que aparece en la fórmula tiene una interpretación física muy importante: la fem originada en la espira es opuesta a la variación del flujo del campo magnético. Esto significa que, por ejemplo, si movemos un imán acercándolo a una espira (Fig. 4.7), la fem inducida es tal que produce una corriente con el sentido indicado en la figura, de tal modo que el flujo de campo magnético creado por ella se opone a la variación del flujo de campo del imán. Concretamente, en el experimento de la figura 4.7, el flujo de campo del imán a través de la espira aumenta, por lo que el creado por la espira estará dirigido en sentido opuesto.

En la experiencia de la figura 4.7, ¿cuál sería el sentido de la corriente eléctrica si el polo del imán que se aproxima a la espira fuese sur en lugar de norte? ¿Y si el imán se moviera alejándose de la espira en lugar de acercándose? Argumenta tus respuestas.

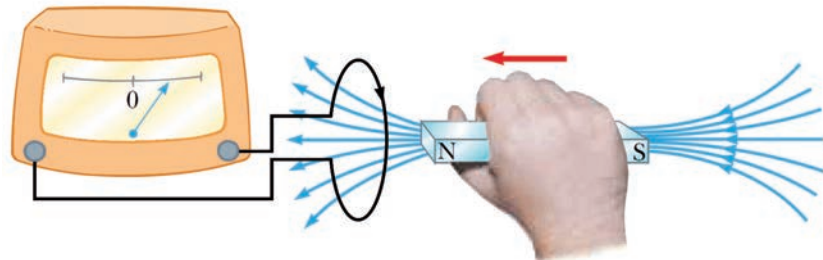
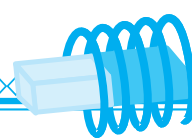


Fig. 4.7. Al acercar un imán a una espira, se induce en ella una fem que se opone al aumento del flujo de campo que la atraviesa.

Observa que cuando aparece corriente en la espira de la figura 4.7, ella se comporta como una especie de imán, con un polo en cada cara. ¿Cuál sería el polo norte y cuál el sur? ¿Qué tipo de fuerza surge entre el imán y la espira? Argumenta tus respuestas.



La **ley de conservación de la energía** permite comprender por qué el flujo de campo magnético creado por la espira tiene que ser opuesto a la variación de flujo del campo magnético externo. Por ejemplo, imaginemos que en el experimento de la figura 4.7 el sentido de la corriente fuese contrario al representado. Entonces el flujo de campo magnético creado por la espira contribuiría a reforzar el aumento del flujo del campo externo. Esto implicaría que creciesen aún más la fem y la corriente en la espira. En otras palabras, la fem y la corriente inducida en la espira aparecerían no solo debido a la acción externa, sino también por sí mismas. Se llegaría así a la conclusión de que la espira crea energía, lo que contradice la ley de conservación de esta magnitud. Por consiguiente, el sentido de la corriente tiene que ser el indicado.

La característica mencionada de la fem inducida fue establecida por Heinrich Lenz, por lo que se conoce como **ley de Lenz**:

La fem inducida en una espira tiende a producir una corriente que genera un flujo de campo magnético opuesto a la variación de flujo del campo magnético externo.

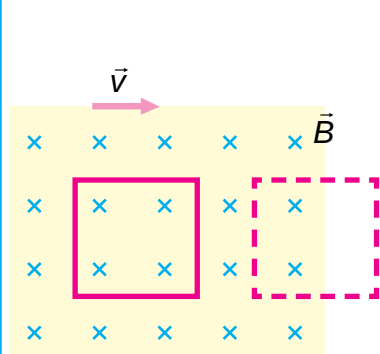


Por lo que se dice en el texto, veo que la ley de Lenz es en realidad consecuencia de una ley mucho más general, la de conservación de la energía.



Ejemplo. 4.1. Una bobina formada por 100 espiras cuadradas, de 10 cm de lado, se encuentra en un campo magnético uniforme de 1.5 T cuyas líneas de campo son perpendiculares al plano de las espiras. La bobina se desplaza a través del campo con velocidad constante y demora 0.50 s desde que comienza a salir del campo hasta que termina. a) Calcula la magnitud de la fem que se induce en la bobina mientras está saliendo del campo. b) Si la bobina tiene una resistencia de 1.6 Ω , ¿cuál es la intensidad de corriente en ella?

A continuación se ha esquematizado la situación descrita. En el esquema se ha representado la sección transversal de la bobina y por eso solo se ve una espira.



a) El flujo de campo magnético que atraviesa la bobina empieza a disminuir a partir del instante en que se inicia su salida del campo. Según la ley de inducción electromagnética, esta variación del flujo de campo origina una fem en las espiras. Puesto que el movimiento de la bobina es uniforme, la rapidez con que varía el flujo es constante y, por tanto, también la fem inducida. Claro está, la fem (como cualquier otra magnitud), no puede variar instantáneamente, pero no tendremos en cuenta el pequeñísimo intervalo de tiempo en que pasa de cero a su valor constante.

La fem inducida en cada espira es:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Como el flujo de campo magnético Φ es perpendicular al plano de las espiras, puede ser hallado utilizando la fórmula $\Phi = BA$.

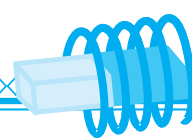
Justo antes de comenzar a salir del campo, el flujo a través de la bobina es BA y cuando termina de salir 0. Por consiguiente, su variación es:

$$\Delta\Phi = 0 - BA = -BA$$

$$\text{El área de la espira es: } A = (10 \times 10^{-2} \text{ m})^2 = 1.0 \times 10^{-2} \text{ m}^2$$

De ahí que la fem inducida en cada espira es:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{-BA}{\Delta t} = -\frac{-(1.5 \text{ T})(1.0 \times 10^{-2} \text{ m}^2)}{0.50 \text{ s}} = 0.030 \text{ V}$$



El signo menos simplemente significa, que la fem es tal que el flujo de campo magnético producido por la espira es opuesto a la variación del flujo del campo magnético externo.

La bobina tiene 100 espiras, por lo que se comporta como si se tratara de 100 fuentes de fem en serie. De modo que la magnitud de la fem en la bobina es 100 veces mayor que en una espira: 3.0 V.

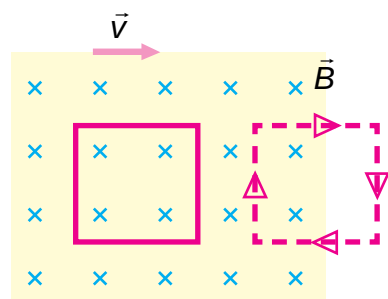
b) Según la ley de Ohm:

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{3.0 \text{ V}}{1.6 \Omega} = 1.7 \text{ A}$$

Ejemplo 4.2. En la situación del ejemplo anterior, encuentra el sentido de la corriente inducida: a) mientras la bobina se mueve, pero aún sin comenzar a salir del campo, b) mientras está saliendo del campo, c) luego de cierto tiempo de haber salido de él.

a) Mientras la bobina se está moviendo en el campo magnético, pero aún sin comenzar a salir de él, el flujo de campo magnético a través de ella permanece constante, por lo que no se induce fem, ni por tanto tampoco corriente eléctrica.

b) Según la ley de Lenz, la corriente debe ser tal que el flujo de campo magnético originado por la bobina sea opuesto a la variación del flujo del campo externo que la atraviesa. De acuerdo con la regla de la mano derecha, en el esquema de la figura la corriente debe circular como se muestra, en sentido horario.



c) Luego de cierto tiempo de haber salido la bobina del campo magnético, no hay variación de flujo de campo magnético a través de ella y por tanto tampoco fem inducida ni corriente eléctrica.



¿Por qué será que en el inciso c del ejemplo 4.2 se pregunta por el sentido de la corriente “luego de cierto tiempo” de haber salido la bobina del campo magnético?

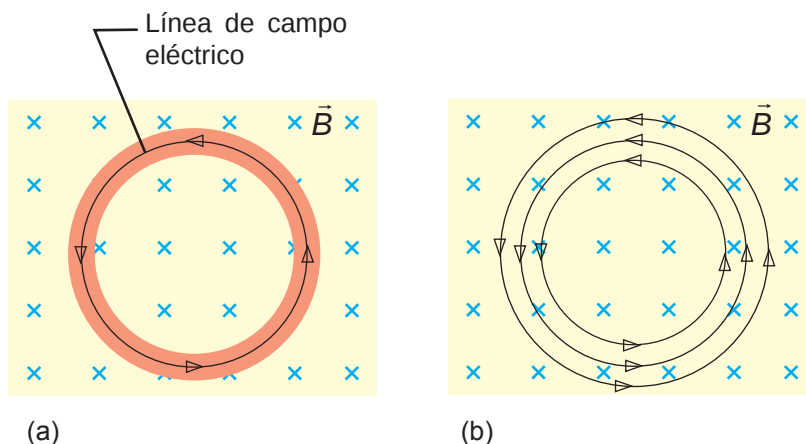
La ley de la inducción electromagnética dice que un flujo variable de campo magnético induce una fem en una espira. Pero el flujo de campo que atraviesa una espira puede variar debido a diversas razones: cambio en la magnitud del campo magnético, en el área atravesada por las líneas de campo, o en el ángulo formado entre dichas líneas y la superficie de la espira. Y resulta que aunque la ley se aplica igualmente en los tres casos, **el fenómeno que da lugar a la aparición de la fem no es el mismo** en el primer caso que en los otros dos. En los apartados que siguen examinamos detenidamente los dos fenómenos que originan la fem inducida. Esto nos permitirá llegar a conclusiones de sumo interés.

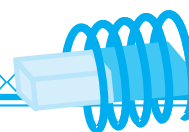
4. 3. Campo eléctrico rotacional.

Consideremos una espira circular situada en un campo magnético uniforme (Figura 4.8a). Si la magnitud del campo varía, el flujo que la atraviesa también y, según la ley de inducción electromagnética, en ella se originan una fem y una corriente. Pero si surge una corriente en la espira, significa que apareció un campo eléctrico. Esto lleva a la conclusión de que:

Un campo magnético variable origina un campo eléctrico.

Fig. 4.8. a) Un campo magnético uniforme de magnitud variable origina un campo eléctrico en la espira, cuyas líneas de fuerza son cerradas. b) Este campo eléctrico aparece aún cuando no haya espira, ésta solo hace posible la existencia de la corriente.





Nota que este campo eléctrico no es producido por acumulación de partículas cargadas, como ocurre durante las experiencias de electrización o al conectar una pila a un conductor, sino **por las variaciones de campo magnético**. Estos campos eléctricos originados de distinto modo tienen ciertas características diferentes.

Así, en la figura 4.8a se ha representado una línea de campo eléctrico en el interior de la espira, observa que es **cerrada**. Cuando el campo eléctrico es creado por cargas, sus líneas parten de las cargas positivas y llegan hasta las negativas, pero en el caso que ahora estamos considerando no son cargas las que lo originan y las líneas de campo no parten de un lugar y terminan en otro, sino que **se cierran sobre sí mismas**.

Un campo cuyas líneas no comienzan en un lugar y terminan en otro, sino que son cerradas, se denomina **campo rotacional**.

Debes prestar atención a otra cuestión que tiene suma importancia. No hay razón para suponer que el campo eléctrico debido a un campo magnético variable aparezca solo en presencia de un conductor, en nuestro caso la espira. **Basta que en cierto lugar del espacio exista un campo magnético variable para que se origine un campo eléctrico**. Y no solo aparece en el lugar ocupado por la espira, sino en toda la región (Fig. 4.8b). La espira hace posible que exista corriente eléctrica, pero el campo eléctrico surge independientemente de ella.

Cabe señalar que aunque no lo habíamos mencionado, el campo magnético es siempre **rotacional**. Esto es evidente, por ejemplo, para un conductor largo y recto con corriente (Fig.3.7). En el caso de un imán, si te fijas solo en su parte exterior, las líneas de campo parecen partir de uno de sus polos y terminar en el otro (Fig.3.6), sin embargo, debes tener en cuenta que en el interior del imán también hay campo magnético. Sus líneas de campo son en realidad continuas.





Lo dicho sobre las líneas de campo magnético de un imán, ¿implica que en su interior van de sur a norte?

Y cuando conectamos una pila en un circuito, ¿las líneas de campo eléctrico en él también son cerradas?



Sí, pero no es que en el exterior del imán comiencen en el polo norte y terminen en el sur, y en su interior a la inversa, sino que simplemente "circulan" por fuera y por dentro de él, de modo similar que en un solenoide con corriente, como en la figura 3.10.

No, tanto en el exterior como dentro de la pila, las líneas se inician en las cargas positivas y terminan en las negativas. Por eso, en su interior el sentido de ellas es contrario que en el exterior.

Mencionaremos, por último, un resultado obtenido por James C. Maxwell, que tuvo enorme repercusión en la ciencia, la tecnología y la vida diaria.

Acabamos de ver que **un campo magnético variable produce un campo eléctrico**. A partir de razonamientos teóricos Maxwell, llegó a la importante conclusión que el recíproco también debía ser cierto, es decir, que **un campo eléctrico variable produce un campo magnético**.

Considera, por ejemplo, el proceso de carga de un condensador de placas paralelas, como el representado en la figura 4.9. Mientras se carga, fluye corriente eléctrica por los conductores y, por tanto, como conoces, alrededor de ellos se origina un campo magnético. Maxwell supuso que debía originar campo magnético no solo la corriente en los conductores, sino **también la variación del campo eléctrico entre las placas del condensador mientras se carga**. Esto lo condujo luego a predecir la existencia de **ondas electromagnéticas**, oscilaciones de campo eléctrico y magnético que se propagan.

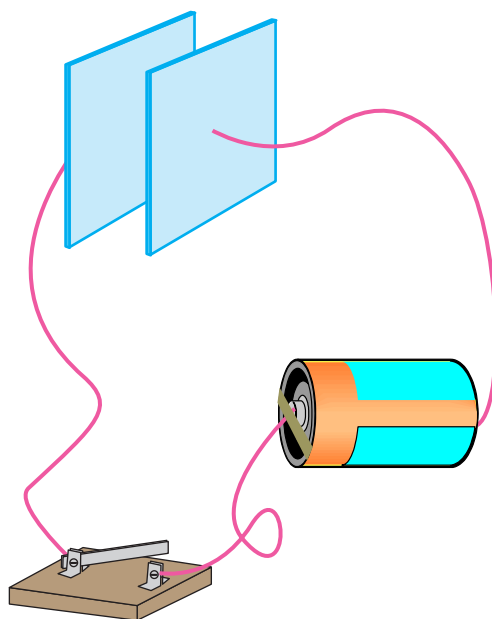
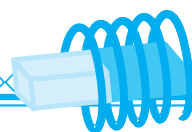


Fig. 4.9. Durante la carga del condensador, no solo se origina campo magnético debido a la corriente que fluye por los conductores, sino también al campo magnético que varía entre las placas.



¿Entonces el funcionamiento de la radio, la televisión y los celulares se basa en los resultados obtenidos por Faraday y Maxwell?

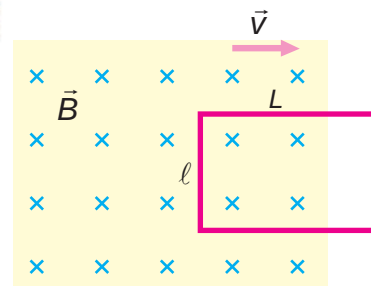
4.4. Inducción electromagnética debida al movimiento de un conductor en un campo magnético.

Acabamos de ver que un **campo magnético variable da lugar a un campo eléctrico** que, a su vez, puede originar corriente eléctrica en un conductor. Este es el fenómeno que tiene lugar en los experimentos de las figuras 4.1 - 4.4. Pero resulta que también puede inducirse corriente en una espira sin que varíe el campo magnético: al cambiar la superficie de ella que es atravesada por el campo, o el ángulo formado entre su superficie y las líneas de campo. Así, en la situación de la figura 4.10, el campo magnético permanece constante y, por tanto, no hay variación de él que dé lugar a un campo eléctrico y, no obstante, aparece corriente eléctrica en la espira, lo cual significa que tiene que haberse originado un campo eléctrico. ¿Cómo se explica la aparición de ese campo eléctrico?

En la figura 4.11 se han representado un campo magnético uniforme que no varía con el tiempo y un conductor metálico que se mueve en él con velocidad $\vec{v}$. El conductor puede ser, por ejemplo, el lado izquierdo de la espira de la figura 4.10



En efecto, aunque no solo se basa en esos resultados, sino también en otros muchos obtenidos por tecnólogos e ingenieros.



4.10. El campo magnético no varía y, no obstante, se induce corriente en la espira de lados ℓ y L . Esto significa que en el conductor aparece un campo eléctrico.

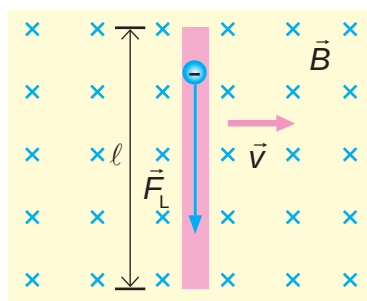


Fig. 4.11. Campo magnético uniforme $\vec{B}$ y conductor ℓ que se mueve en él con velocidad $\vec{v}$ constante. Sobre los electrones libres del conductor actúa la fuerza de Lorentz $\vec{F}_L$.



Los electrones libres del conductor se mueven, como parte de todo él, a la velocidad $\vec{v}$ perpendicular a las líneas de campo magnético. Por consiguiente, sobre ellos actúa una fuerza de Lorentz, de magnitud $F_L = qBv$ y que es perpendicular al vector $\vec{B}$ y a la velocidad $\vec{v}$, es decir, dirigida a lo largo del conductor. Utilizando la regla de la mano derecha puedes comprobar que el sentido de la fuerza de Lorentz es el indicado en la figura.

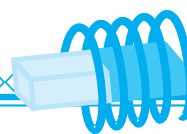
Bajo la acción de la fuerza de Lorentz los electrones se desplazan hacia la parte inferior del conductor, concentrándose en ella y dejando la parte superior cargada positivamente. Esta acumulación de cargas de signos opuestos en los extremos del conductor, origina un campo eléctrico en su interior y una diferencia de potencial entre sus extremos.

Explica con tus propias palabras el origen de la fem inducida en un conductor que se mueve en un campo magnético constante.



La diferencia de potencial que aparece en un conductor que se mueve en un campo magnético constante usualmente se denomina *fem de movimiento*.

La fem de movimiento es lo que explica la aparición de corriente eléctrica en la situación de la figura 4.10. Mientras la espira se mueve completamente introducida en el campo, hay una acumulación de cargas de signos opuestos tanto en los extremos de su lado derecho como en los extremos del izquierdo. Sin embargo, los campos eléctricos originados en el interior de la espira por estas acumulaciones de carga, tienen sentidos opuestos, por lo que no aparece corriente eléctrica en ella. Pero cuando su lado derecho ya ha salido del campo magnético, entonces solo existe acumulación de cargas en los extremos de su lado izquierdo y el campo eléctrico provoca la corriente eléctrica.



Ahora mostraremos que si en la situación de la figura 4.10 se halla la fem inducida a partir de la expresión de la fuerza de Lorentz, el resultado es el mismo que al utilizar la ley de inducción electromagnética.

A partir de la fuerza de Lorentz ($F_L = qvB$):

En el lado izquierdo de la espira ℓ , los electrones se desplazan hacia el extremo inferior hasta que la fuerza de Lorentz que origina ese desplazamiento, $F_L = qvB$, es compensada por la debida al campo eléctrico, $F_E = qE$. Cuando esto ocurre:

$$qE = qvB$$

De ahí que la magnitud del campo eléctrico originado dentro del conductor es:

$$E = vB$$

Y la diferencia de potencial entre sus extremos:

$$\Delta V = Ed = vB\ell$$

A partir de la ley de inducción electromagnética $\left(\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right)$:

Mientras la espira está totalmente introducida en el campo magnético, el flujo de campo que la atraviesa es:

$\Phi = BA$, donde A es el área de su superficie.

Pero según la espira va saliendo del campo, su superficie atravesada por el flujo disminuye, hasta que finalmente se hace cero. Por eso, la variación de flujo desde que comienza a salir hasta que termina, es:

$$\Phi = 0 - BA = -BA$$

El texto analiza solo lo que ocurre en los lados derecho e izquierdo de la espira de la figura 4.10. ¿Y qué sucede en sus otros dos lados?





De ahí que:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{-BA}{\Delta t} = \frac{BA}{\Delta t}$$

Y como el área A de la espira es $A = \ell L$.

Se tiene:

$$\varepsilon = \frac{B\ell L}{\Delta t}$$

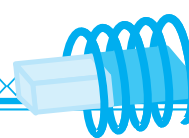
Nota que L es el lado mayor de la espira, pero a la vez, es la distancia recorrida por ella desde que comienza a salir del campo magnético hasta que termina. Por consiguiente, $L/\Delta t$ representa la velocidad v con que se mueve.

Por tanto:

$$\varepsilon = B\ell v$$

Nota que este resultado coincide con el anteriormente obtenido.

Como puedes ver, la ley de inducción electromagnética, pese a tener una expresión tan simple ($\varepsilon = -\Delta\Phi/\Delta t$), posee un elevado grado de generalidad, permite determinar la fem inducida en una espira debido a dos fenómenos diferentes: 1) la aparición de un campo eléctrico a causa de un **campo magnético variable** y 2) la aparición de una fem de movimiento a causa de la **fuerza de Lorentz** que actúa sobre las partículas cargadas de la espira.



4.5. Utilización práctica de la inducción electromagnética.

En este apartado abordaremos la segunda de las preguntas planteadas al iniciar el capítulo: *¿Cuáles son algunos de los desarrollos tecnológicos más relevantes que hizo posible el estudio de la inducción electromagnética?*

La ley de inducción electromagnética constituye la base sobre la que se apoya el funcionamiento de numerosos dispositivos: generadores eléctricos, transformadores, lectura de cintas y discos magnéticos mediante cabezales, hornos de inducción, guitarra eléctrica y muchos otros. A continuación describimos, simplificadaamente, el principio de funcionamiento de los tres primeros.

4.5.1. Generador de inducción electromagnética.

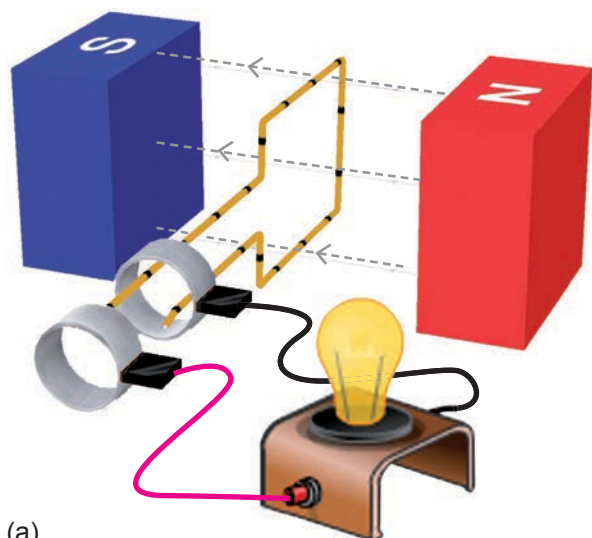
Los generadores de inducción electromagnética y los transformadores son de suma importancia en la vida moderna. Se utilizan para producir y transmitir la mayor parte de la energía eléctrica que consumimos.

El principio físico básico del funcionamiento de los generadores de inducción consiste en la **inducción de una fem al hacer rotar una espira en un campo magnético**. Su estructura es muy similar a la del clásico motor eléctrico, descrito en el apartado 3.7.

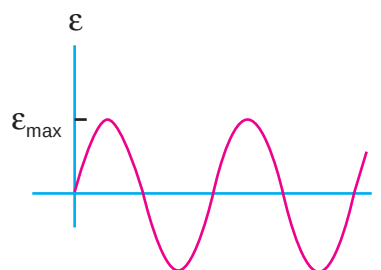
Consideremos una espira que puede rotar colocada en un campo magnético (Fig. 4.12a). A medida que rota, cambia el ángulo formado entre su superficie y las líneas de campo y, por tanto, el flujo de campo magnético a través de ella. Según la ley de inducción electromagnética, esto induce una fem en la espira. En la posición representada en la figura, las líneas de campo penetran por su cara izquierda y salen por la derecha, pero cuando la espira ha dado media vuelta, entonces la cara por donde penetran es la opuesta, por lo que el sentido de la fem inducida es el contrario. El resultado es una fem inducida que alterna su sentido cada media vuelta de la espira. Se tiene así una fuente de **fem alterna**. Este tipo de generador de inducción es el más utilizado y se denomina **alternador**. Si la espira rota con



velocidad angular constante, la variación de la fem con el tiempo es sinusoidal (Fig. 4.12b).



(a)

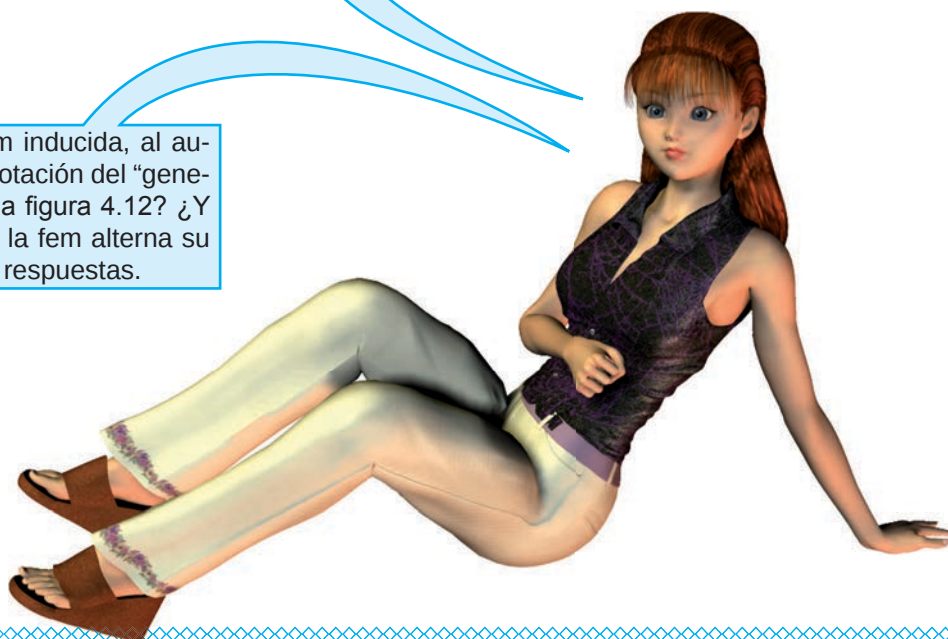


(b)

Fig. 4.12. (a) Principio físico de un generador de inducción de corriente alterna: en una espira que rota en un campo magnético se induce una fem. (b) fem inducida en función del tiempo cuando la espira rota con velocidad angular constante.

¿Cuál de los dos tipos de fenómenos que pueden originar una fem inducida, es el que tiene lugar en las espiras de un generador de inducción mientras rota?

¿Qué sucederá a la fem inducida, al aumentar la velocidad de rotación del "generador de inducción" de la figura 4.12? ¿Y a la frecuencia con que la fem alterna su sentido? Argumenta tus respuestas.



Empleando un **conmutador**, como en los motores de corriente directa, puede obtenerse una fuente de fem cuyo sentido no alterne (Fig.4.13a), aunque no será constante, sino pulsante.

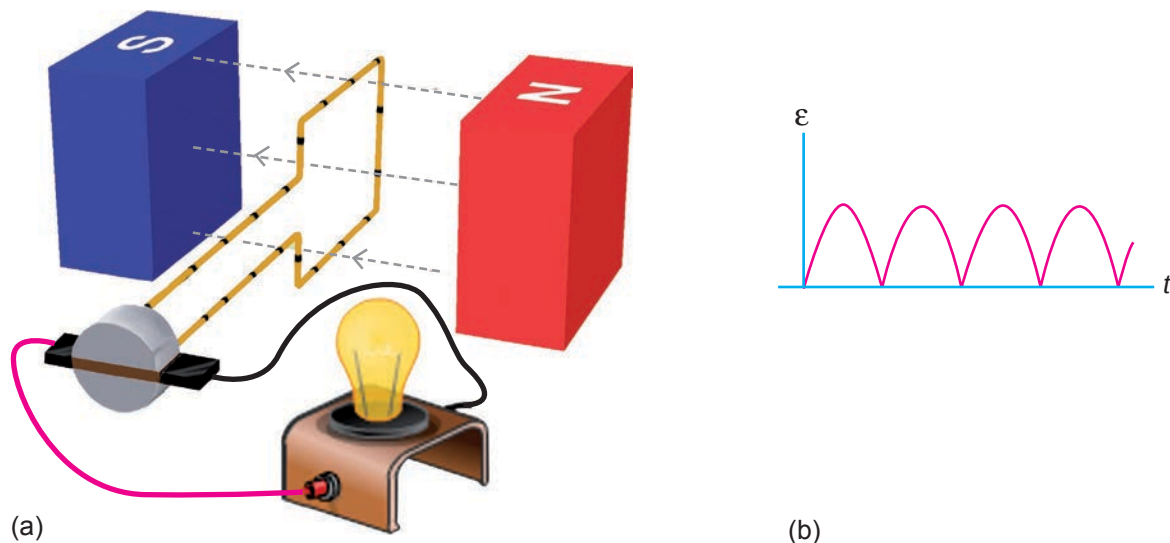


Fig. 4.13. (a) Principio de funcionamiento un generador de inducción de corriente directa. (b) la fem inducida varía con el tiempo, es pulsante, pero su sentido no se invierte.

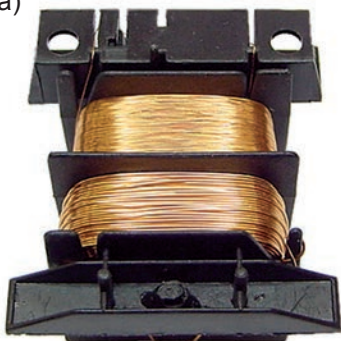
Los generadores de inducción electromagnética pueden hacerse rotar por muy diversos medios. Por ejemplo, en las termoeléctricas, el combustible es utilizado para transformar agua en vapor, el cual luego se dirige a gran velocidad a las paletas de la turbina; en las hidroeléctricas es el agua que cae desde cierta altura la que se dirige a las paletas de la turbina; para encender las luces de las bicicletas también se emplean pequeños generadores de inducción electromagnética.

Resume con tus propias palabras el principio físico básico de los motores de inducción electromagnética y las características de la fem inducida.

¿Qué transformación de energía tiene lugar en un generador de inducción electromagnética?



(a)



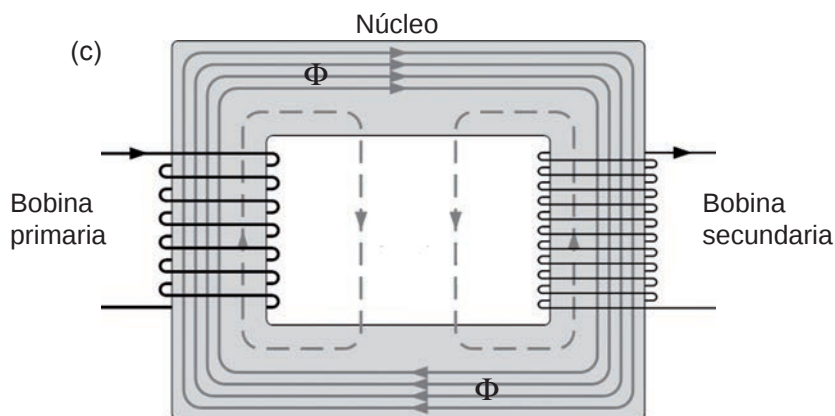
4.5.2. Transformador.

Un transformador simple consiste en dos bobinas de diferente número de espiras, enrolladas alrededor de un núcleo de hierro. En la figura 4.14 se muestran: (a) el interior de un pequeño transformador, (b) un transformador típico de la red de transmisión de electricidad, (c) el esquema de su componente fundamental y (d) su símbolo.

(b)



(c)



(d)

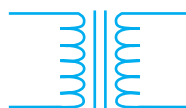
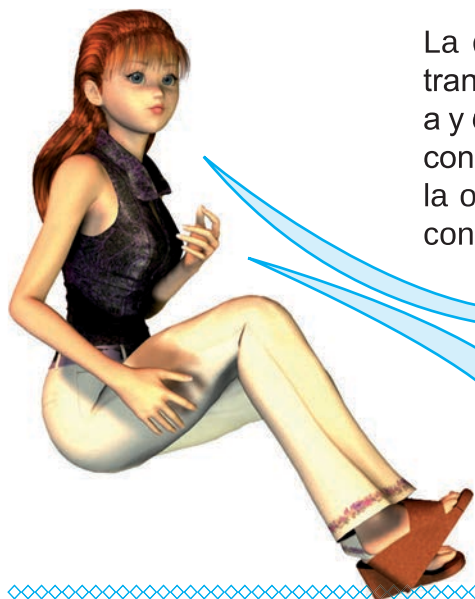


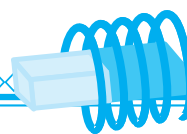
Fig. 4.14. (a) Interior de un transformador pequeño común. (b) Típico transformador utilizado en las redes de transmisión de energía eléctrica. (c) Esquema del componente fundamental de un transformador. (d) Símbolo del transformador, utilizado en los esquemas de los circuitos.



La corriente eléctrica variable en una de las bobinas del transformador, denominada primario o “entrada”, (Fig. 4.14 a y c) origina un campo magnético variable en el núcleo. En consecuencia, el flujo de campo magnético que atraviesa la otra bobina, denominada secundario o “salida”, cambia con el tiempo, debido a lo cual se induce una fem en ella.

¿Cuál de los dos fenómenos que pueden originar una fem inducida es el que tiene lugar durante el funcionamiento de un transformador?

¿Podría un transformador funcionar con corriente constante, como la producida, por ejemplo, por una pila? Argumenta tu respuesta.



Si la bobina de entrada tiene menor número de espiras que la de salida, como es el caso del esquema de la figura 4.14c, el transformador produce una elevación del voltaje (transformador elevador). Este es el tipo de transformador utilizado, por ejemplo, cuando se necesita elevar el voltaje de 110 a 220 V. Si, a la inversa, la bobina de entrada tiene mayor número de espiras que la de salida, entonces el transformador produce una disminución del voltaje (transformador reductor). En los radios, grabadoras, computadoras, impresoras y otros equipos, se emplean transformadores reductores, ya que sus circuitos trabajan con voltajes mucho menores de 110 V.

Menciona posibles causas de las pérdidas de energía en los transformadores.



Los transformadores transmiten energía eléctrica de su entrada a la salida y en este proceso, naturalmente, se produce cierta disipación de energía. Sin embargo, si las pérdidas son pequeñas, entonces puede suponerse que la cantidad de energía que llega al transformador por unidad de tiempo y la que sale de él, es decir, la potencia en el primario y en el secundario, son iguales. De este modo, en un transformador ideal:

$$P_p = P_s$$

Y como $P = VI$, se tiene:

$$V_p I_p = V_s I_s$$

Esto significa que en las terminales del transformador en la que el voltaje sea menor, la intensidad de corriente será mayor, y a la inversa, donde el voltaje sea mayor la intensidad de corriente será menor.

A la salida de las plantas eléctricas se utilizan transformadores elevadores, con lo cual se eleva el voltaje y se reduce la intensidad de la corriente. Esto tiene el propósito de disminuir las pérdidas de energía por calentamiento en los cables durante la transmisión de la energía eléctrica a grandes distancias. Por supuesto, antes de distribuir la energía eléctrica para su consumo, es necesario disminuir nuevamente su voltaje por medio de transformadores reductores.





Ejemplo 4.3. Cierta equipo funciona con un transformador reductor de 110 V a 9.0 V. Si la intensidad de corriente a la entrada del equipo es 250 mA, ¿cuál es la intensidad de corriente en el primario del transformador? Considera que no hay pérdidas en el transformador.

$$V_p I_p = V_s I_s$$

Por consiguiente:

$$I_p = \frac{V_s I_s}{V_p} = \frac{(9.0 \text{ V})(250 \text{ mA})}{110 \text{ V}} = 20 \text{ mA}$$



Resume con tus propias palabras el principio de funcionamiento de los transformadores.

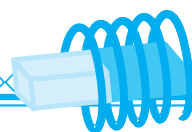
Realiza un dibujo esquemático que muestre las etapas de generación, transmisión y consumo de energía eléctrica en una red, en el cual aparezcan los transformadores.

4.5.3. Lectura de información grabada en materiales magnéticos.

En el apartado 3.7.3 vimos que el material de que están hechos las cintas y discos utilizados en la grabación magnética, está impregnado de pequeñísimas partículas ferrosas, que se comportan como diminutos imanes. En una pequeña porción del material grabado, tales imanes tienen una orientación que depende de la información.

Como hemos dicho, la parte fundamental del clásico cabezal es un pequeño electroimán, es decir, una bobina con un núcleo de material ferroso. Cuando la cinta o disco grabado pasa muy próxima al electroimán del cabezal, **induce en él una fem**, que varía según la distribución que tienen los diminutos imanes. Luego esta fem es amplificada y enviada a la bocina o audífono.

Cabe señalar, sin embargo, que en los discos duros el sistema de lectura basado en el fenómeno de la inducción



electromagnética, ha sido reemplazado por otros cada vez más eficientes, basados en un fenómeno distinto a la inducción electromagnética: la **variación de la resistencia eléctrica** de cierto dispositivo debido a la acción del campo magnético del material grabado durante su paso frente a él. Esto ha permitido elevar la densidad de información que puede ser leída. No obstante, para el grabado continúa empleándose el mismo sistema de magnetización descrito en el apartado 3.7.3.

4.6. Autoinducción e Inductancia.

En este apartado examinaremos la implicación que tiene el fenómeno de la inducción electromagnética durante las variaciones de corriente eléctrica en las bobinas. Esto tiene especial interés, puesto que las bobinas son parte importante de motores eléctricos, generadores de inducción, transformadores y circuitos electrónicos.

Para simplificar, consideremos un circuito (a) formado solo por una bobina, una fuente de fem (por ejemplo una pila) y un interruptor (Fig. 4.15a). La bobina puede ser, por ejemplo, una de las del experimento de Faraday (Fig. 4.1), la de un electroimán, un transformador u otro dispositivo. R representa la resistencia eléctrica total del circuito, debida al alambre de la bobina, la resistencia interna de la fuente y los cables de conexión (Fig. 4.16b). Cuando se cierra el interruptor, en el circuito se establece una corriente eléctrica cuya intensidad es, según la ley de ohm: (b) $I = \mathcal{E} / R$. Sin embargo, **la corriente no alcanza ese valor inmediatamente**.

A medida que la corriente en la bobina se incrementa, también se incrementa el flujo del campo magnético creado por ella. Este flujo variable induce una fem en las espiras de la bobina, de modo similar que si, por ejemplo, se le acercara o alejara un imán, lo único que en este caso

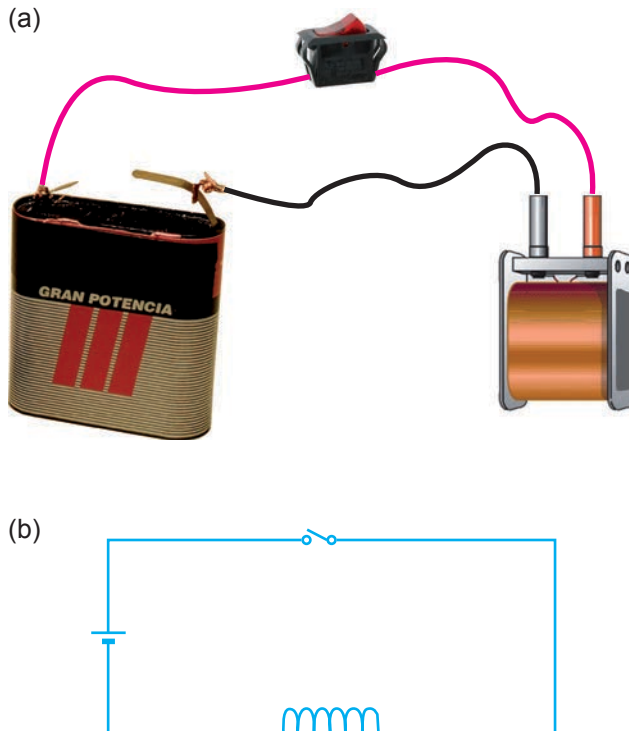


Fig. 4.15. (a) Circuito eléctrico formado por una bobina, una fuente de fem y un interruptor, (b) Esquema del circuito. Al cerrar el interruptor, en la bobina se induce una fem de sentido contrario a la de la fuente.





Utiliza tú mismo la ley de Lenz para verificar que al abrir el interruptor en el circuito de la figura 4.15, la fem autoinducida es opuesta a la de la fuente.

el flujo es producido **por la propia bobina**. El sentido de la fem inducida se determina utilizando la ley de Lenz: es tal que tiende a crear una corriente inducida de modo que el flujo de su campo magnético se oponga a la variación que tiene lugar. El resultado en este caso es, pues, una fem inducida de sentido contrario al de la fuente de fem.

Ah!, ya comprendo, el establecimiento de la corriente en el circuito de la figura 4.15 se ve demorado a causa de que se origina una fem opuesta a la de la fuente.

El fenómeno descrito se denomina **autoinducción**. Este término proviene del hecho que la fem inducida no tiene su origen en un agente externo, digamos, un imán u otra bobina, sino en la propia bobina. En este caso la fem inducida se llama **fem autoinducida**, y suele designarse por ε_L .

¿Y qué sentido tendrá la fem autoinducida si después de establecida la corriente eléctrica, se abre el interruptor?

Mientras más rápidamente varíe la corriente en la bobina al cerrar el interruptor (mientras mayor sea $\Delta I / \Delta t$), mayor será la rapidez con que varía el flujo de campo magnético en ella y, por tanto, según la ley de inducción electromagnética ($\varepsilon = \Delta \Phi / \Delta t$), mayor la fem autoinducida.

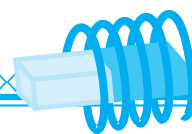
La fem autoinducida en una bobina, ε_L , es directamente proporcional a la rapidez con que varía la intensidad de corriente debida a la fuente.

En símbolos:

$$\varepsilon_L \propto \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Esta relación puede escribirse:

$$\varepsilon_L = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$



En esta ecuación, L es una constante de proporcionalidad, denominada **inductancia**, que depende de las características de la bobina. Por ejemplo, es obvio que en una bobina con muchas espiras, el fenómeno de inducción electromagnética será más acentuado que en otra con muy pocas espiras y, por tanto, la fem autoinducida mayor, por lo que su inductancia L también lo será.

De la fórmula anterior se ve que:

$$L = \frac{\varepsilon_L}{\Delta I} = \frac{\varepsilon_L \Delta t}{\Delta I}$$

De esa expresión se infiere que en el sistema internacional, la inductancia se mide en Vs/A. Sin embargo, esta unidad recibe el nombre especial de **henry** (H), en honor del físico estadounidense Joseph Henry (1797-1878), a quien se atribuye el descubrimiento del fenómeno de la autoinducción. Los dispositivos específicamente diseñados para que ten-

gan una elevada inductancia se denominan **inductores**. (Fig. 4.16). Ellos se utilizan ampliamente en circuitos de radios, televisores, y en muchos otros circuitos electrónicos.

Mientras que el clásico **condensador** o **capacitor** es el de placas paralelas (Apartado 1.2.9), el clásico **inductor** es un solenoide. Su inductancia L depende del número de espiras, sus dimensiones y las características de su núcleo. Concretamente, la inductancia de un solenoide largo y con sus espiras bien juntas es:

$$L = 2.0 \times 10^{-7} \frac{N^2 A}{\ell}$$

Donde N es el número de espiras, A el área de la sección transversal del solenoide y ℓ su longitud. Al introducir un núcleo ferroso en él, su inductancia puede aumentar cientos de veces.

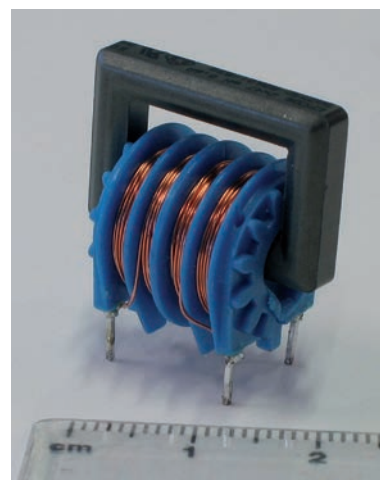
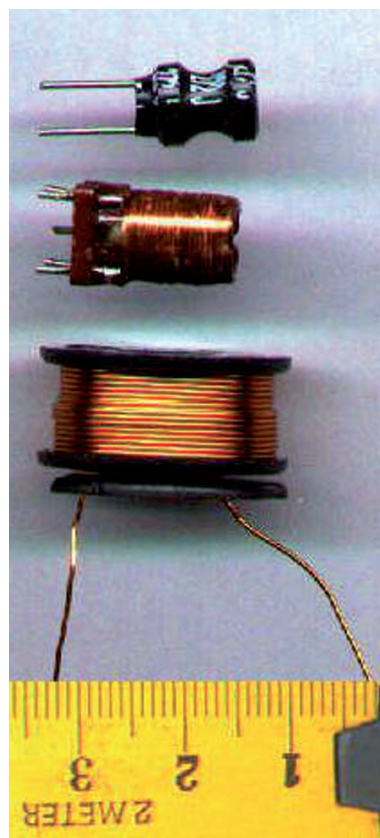


Fig. 4.16. Algunos tipos de inductores.



¿De qué factores depende y cómo, la inductancia L de un solenoide y, en general, de una bobina?



¡La inductancia de una bobina es una medida de su inercia a variar la corriente, de modo parecido que la masa de un cuerpo es una medida de su inercia a variar su velocidad!



¿Y saltará también una chispa al cerrar el circuito?

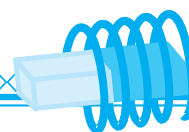
A mayor inductancia L de un dispositivo, más difícil resulta el cambio de la intensidad de corriente en él, pues mayor es la fem de autoinducción que se opone. De modo que si bien la resistencia eléctrica constituye una medida de la oposición de un material al paso de corriente eléctrica, **la inductancia L constituye una medida de la oposición de un dispositivo a variar la corriente eléctrica.** Este hecho tiene gran importancia en los circuitos de corriente alterna. Así, si se conecta una bobina a una fuente de fem constante, la intensidad de corriente que se establece está determinada únicamente por la fem y la resistencia del circuito, pero si se conecta a una fuente de fem alterna, entonces la intensidad depende además de la inductancia de la bobina.

Si la bobina del circuito de la figura 4.15 tiene una inductancia relativamente grande, entonces al abrir el interruptor salta una chispa. ¿Cómo pudieras explicar esto?

4.7. Energía del campo magnético.

Si la bobina del circuito de la figura 4.15 tiene una inductancia relativamente grande, al abrir el interruptor salta una chispa. La fem autoinducida en la bobina puede llegar a ser tan elevada que resulte incluso peligrosa para el organismo humano. Esto sugiere que una bobina con corriente almacena cierta cantidad de energía.

Un circuito como el de la figura 4.17 permite evidenciar que una bobina almacena energía, e incluso estimar dicha energía. Luego de breve tiempo después de haber cerrado el interruptor, en la bobina se establece una corriente eléctrica constante. El condensador no se carga, pues el diodo lo impide. Al abrir el interruptor, se origina una fem



opuesta a la disminución de la corriente eléctrica en la bobina, la cual da lugar a una corriente eléctrica que carga el condensador. Cuando la corriente eléctrica en la bobina ha decrecido hasta cero, la energía que ella almacena también. Una parte de esa energía se disipa por calentamiento en el circuito durante el paso de la corriente eléctrica, pero la mayor parte se acumula en el condensador. Conociendo la capacidad C de éste y midiendo el voltaje máximo V entre sus placas, es posible estimar, mediante la fórmula $E_c = \frac{1}{2} CV^2$, la energía acumulada en él y, por tanto, la que antes almacenaba la bobina.

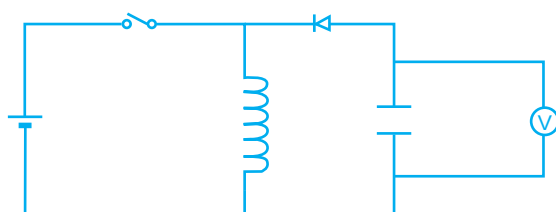


Fig. 4.17. Cuando se cierra el interruptor y pasa corriente por la bobina, se almacena en ella cierta cantidad de energía. Al abrir el interruptor, la mayor parte de esa energía pasa al condensador.

Mientras que en un condensador la energía se almacena en el campo eléctrico producido por las cargas eléctricas de sus placas, en un inductor lo hace en el campo magnético originado por la corriente.

La fórmula para calcular la energía almacenada en un inductor con corriente es análoga a la fórmula para calcular la energía acumulada en un condensador: $E_L = \frac{1}{2} LI^2$, donde L es la inductancia del inductor e I la intensidad de corriente en él.

Ah, mientras mayores sean la inductancia de una bobina y la intensidad de corriente en ella, mayor es la energía que acumula en su campo magnético. Parece lógico.





Ejemplo. 4.4. Si en el circuito de la figura 4.17, la corriente en la bobina con el interruptor cerrado era 0.50 A, la capacidad del condensador 4.0 μF y el voltaje máximo indicado por el voltímetro luego de abrir el interruptor 10 V, a) ¿cuál era, aproximadamente, la energía almacenada en la bobina?, b) ¿cuál es su inductancia? Desprecia las pérdidas de energía por calentamiento de los conductores.

a) Cuando se abre el interruptor, la energía almacenada en la bobina pasa al condensador. Esta es:

$$E_c = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} (4.0 \times 10^{-6} \text{ F}) (10.0 \text{ V})^2 = 2.0 \times 10^{-4} \text{ J}$$

b) Teniendo en cuenta que la energía almacenada en la bobina, $E_L = \frac{1}{2} LI^2$, pasó al condensador, podemos escribir:

$$E_L = \frac{1}{2} LI^2 = 2.0 \times 10^{-4} \text{ J}$$

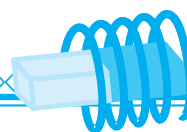
De ahí que:

$$L = \frac{2(2.0 \times 10^{-4} \text{ J})}{(0.50 \text{ A})^2} = 1.6 \times 10^{-3} \text{ H}$$

4.8. Ondas electromagnéticas y algunas de sus aplicaciones.

Examinaremos la última cuestión clave planteada al inicio del capítulo: *¿En qué consiste una onda electromagnética?*

En la primera unidad vimos que si se tienen dos cuerpos electrizados que interactúan entre sí, situados a cierta distancia uno del otro, y movemos uno de ellos, dicho movimiento se refleja con gran rapidez en el segundo, aunque no instantáneamente. Algo similar ocurre en las antenas transmisoras y receptoras de radio y televisión. En la antena transmisora se hace que los electrones oscilen de determinado modo y, al cabo de cierto tiempo, estas oscilaciones se repiten en la antena receptora. Describamos, muy esquemáticamente, el proceso que tiene lugar.



¿Por qué en las experiencias de electrización parece que la acción de un cuerpo electrizado sobre otro es instantánea? ¿Puedes mencionar alguna evidencia de que las señales emitidas por una antena requieren cierto tiempo para llegar hasta la antena receptora?

Para que los electrones oscilen en la antena transmisora se requiere un **campo eléctrico oscilatorio**. Por otra parte, las oscilaciones de corriente eléctrica representadas por este movimiento de electrones, producen a su alrededor un **campo magnético oscilatorio**. Pero de acuerdo con la ley de inducción electromagnética, este campo magnético variable genera, a su vez, un **campo eléctrico**, que en este caso también es oscilatorio. Nuevamente, este campo eléctrico oscilatorio, que ya no está restringido a los límites del conductor que forma la antena, genera un campo magnético oscilatorio y así sucesivamente. El ciclo de este proceso podemos sintetizarlo del siguiente modo:

Campo eléctrico oscilatorio $\Rightarrow$ Campo magnético oscilatorio
 $\Rightarrow$ Campo eléctrico oscilatorio.

Ya veo, la generación de ondas electromagnéticas se explica a partir de los resultados obtenidos por Faraday y Maxwell. Faraday mostró que un campo magnético variable origina un campo eléctrico y Maxwell, que un campo eléctrico variable produce un campo magnético.

La sucesión anterior se repite continuamente a través del espacio. Las oscilaciones de los campos eléctrico y magnético propagándose en el espacio constituyen una **onda electromagnética**.

Las oscilaciones de campo eléctrico que llegan a la antena receptora, aunque por supuesto con una amplitud atenuada, actúan sobre sus electrones, haciendo que oscilen del mismo modo que los de la antena transmisora.

Menciona algunas posibles razones por las que la amplitud de las ondas generadas en una antena transmisora de radio o televisión se atenúan durante su propagación.





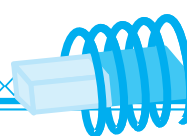
La velocidad de propagación de la onda electromagnética en el aire es aproximadamente 300 000 km/s, en otros medios, por ejemplo en el agua, es menor, pero de todos modos muy grande.

Comenta algunos desarrollos tecnológicos basados en la utilización de ondas electromagnéticas.



Las ondas electromagnéticas se clasifican en varios tipos, atendiendo a determinados rangos de sus frecuencias. Así, en orden creciente de frecuencia tenemos: las ondas de radio habituales, de baja y alta frecuencia; las ondas de FM y de televisión; las microondas; la radiación infrarroja; la luz visible; la radiación ultravioleta; los rayos X; los rayos gamma. Esta gama de ondas electromagnéticas constituye lo que se conoce como **espectro de las ondas electromagnéticas**. Los propios nombres utilizados para clasificar a las ondas electromagnéticas según su frecuencia, seguramente te dan idea de la variedad de aplicaciones que tienen y de su implicación en nuestras vidas.

Indaga en Internet acerca del principio de funcionamiento del horno microondas.



4.9. Actividades de sistematización y consolidación.

4.9.1. Sopa de letras.

Escribe cada palabra en Wik pedia o en Encarta y da un vistazo a lo que encuentres.



Térmico
Luminoso
Químico
Magnético
Inducción
Bobina
Espira
Imán
Electromagnética

Fem
Flujo
Campo
Faraday
Lenz
Maxwell
Lorentz
Rotacional
Generador
Tranformador

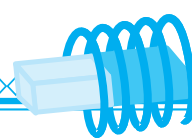
Autoinducción
Inductancia
Inductor
Energía
Onda
Espectro



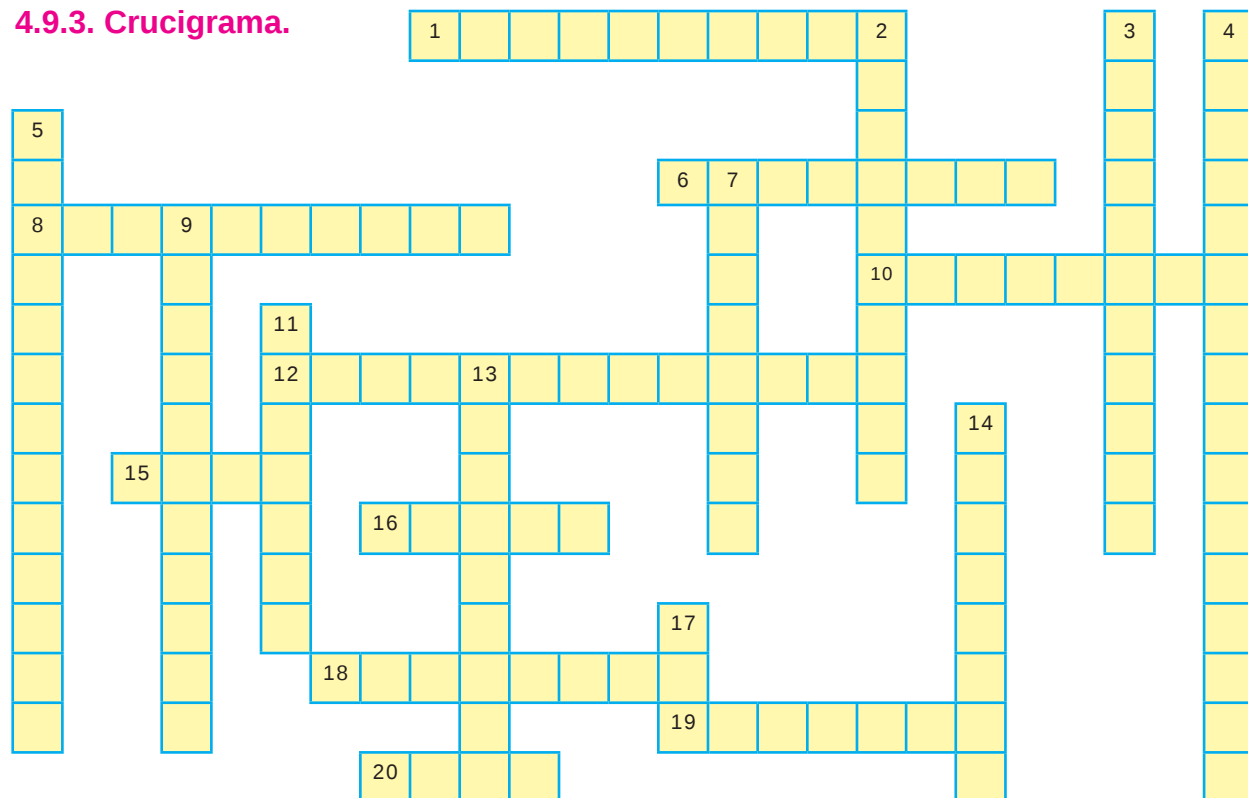


4.9.2. Conexión de conceptos e ideas.

- | | | |
|---|---|--|
| 1. Científico a quien se debe la ley de inducción electromagnética. | (|) Ángulo entre la superficie y las líneas de campo. |
| 2. Primer hecho que descubrió Faraday relativo a la ley de inducción electromagnética. | (|) Autoinducción de una fem. |
| 3. Uno de los factores de los que depende la fem inducida en una bobina cuando se mueve un imán cerca de ella. | (|) Conservación de la energía. |
| 4. Magnitud física que mide la "cantidad de campo magnético" que atraviesa cierta superficie. | (|) Fem de movimiento. |
| 5. Una de las magnitudes de las que depende el flujo de campo magnético que atraviesa cierta superficie. | (|) Fem inducida. |
| 6. Nombre del fenómeno que consiste en la aparición de una corriente eléctrica en un espira, al variar el flujo de campo magnético que la atraviesa. | (|) Flujo de campo magnético. |
| 7. Magnitud de la que depende la fem inducida en una espira. | (|) Heinrich Lenz. |
| 8. Magnitud directamente proporcional a la rapidez con que varía el flujo de campo magnético a través de una espira. | (|) Inducción de una fem mediante rotación de espiras en un campo magnético. |
| 9. Científico a quien se debe la regla para determinar el sentido de la corriente inducida en una espira. | (|) Inducción electromagnética. |
| 10. Ley general de la que es consecuencia la ley de Lenz. | (|) Intensidad de la corriente. |
| 11. Uno los dos fenómenos que puede producir una fem inducida en una espira. | (|) Michael Faraday. |
| 12. Conclusión fundamental a la que llegó Maxwell a partir de razonamientos teóricos. | (|) Número de espiras. |
| 13. Nombre de la diferencia de potencial que aparece en un conductor que se mueve en un campo magnético que no varía con el tiempo. | (|) Onda electromagnética. |
| 14. Principio físico básico de los generadores eléctricos que más se utilizan en la actualidad. | (|) Rapidez con que varía el flujo de campo magnético que la atraviesa. |
| 15. Principio físico básico de los transformadores. | (|) Rapidez con que varía la corriente eléctrica en ella. |
| 16. Fenómeno que retarda el establecimiento de una corriente eléctrica constante en una bobina, cuando ésta se conecta a una fuente de fem constante. | (|) Un campo eléctrico variable origina un campo magnético. |
| 17. Una de las magnitudes de las que depende la fem autoinducida en una bobina. | (|) Una corriente variable en una bobina induce corriente en otra bobina. |
| 18. Una de las magnitudes de las que depende la energía almacenada en el campo magnético de una bobina. | (|) Variación de un campo magnético. |
| 19. Una de las magnitudes de las que depende la inductancia de una bobina. | (|) Variación del flujo de campo magnético que atraviesa las bobinas. |
| 20. Nombre que recibe la propagación de oscilaciones de campo eléctrico y magnético. | (|) Velocidad del movimiento relativo entre ellos. |



4.9.3. Crucigrama.



Horizontales

1. Parte de un generador de inducción electromagnética que permite convertir una fem alterna en directa.
6. Nombre que recibe el enrollado o bobina de un transformador a cuyos terminales se conecta el voltaje que se desea reducir o elevar.
8. Nombre que reciben los generadores de inducción de los que se obtiene una fem que varía su sentido cíclicamente.
10. Nombre que recibe un dispositivo específicamente diseñado para que tengan una elevada inductancia.
12. Fenómeno que consiste en la generación de una fem por la propia bobina al variar la corriente eléctrica en ella.
15. Una de las magnitudes de las que depende el flujo de campo magnético que atraviesa determinada superficie.
16. Magnitud utilizada para caracterizar el campo magnético que atraviesa una espira.
18. Característica que debe tener la corriente eléctrica en una bobina para que induzca corriente en otra que está en reposo respecto a ella.
19. Apellido del científico que por medio de razonamientos teóricos llegó a la conclusión que un campo eléctrico variable produce un campo magnético.
20. Apellido del científico a quien se debe la regla para determinar el sentido de la corriente inducida en una espira.

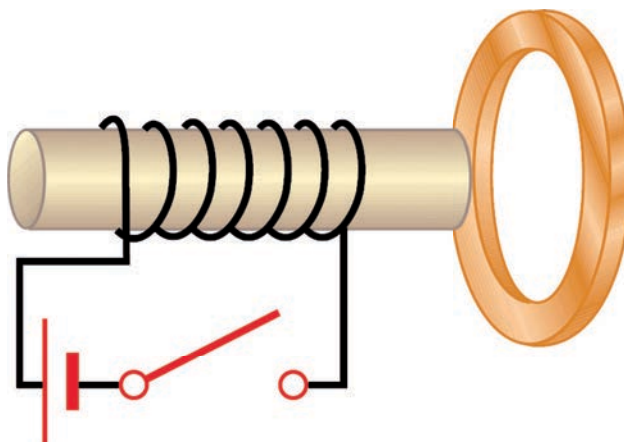
Verticales

2. Adjetivo utilizado para describir cierta característica del campo eléctrico originado por un campo magnético variable.
3. Magnitud utilizada para caracterizar la oposición o inercia de un dispositivo a variar la corriente eléctrica en él.
4. Tipo de onda que consiste en la propagación de oscilaciones de campo eléctrico y campo magnético.
5. Nombre del dispositivo eléctrico que permite elevar o reducir un voltaje.
7. Tipo de movimiento mediante el cual se induce una fem en las espiras de un generador de inducción electromagnético.
9. Parte fundamental de los cabezales de grabación y lectura de sonido en una cinta magnética.
11. Apellido del científico que descubrió el fenómeno de la inducción electromagnética.
13. Palabra utilizada para indicar el fenómeno que consiste en originar una corriente eléctrica en una bobina, al mover un imán recto en su interior.
14. Tipo de corriente eléctrica con la que puede funcionar un transformador.
17. Magnitud directamente proporcional a la rapidez con que varía el flujo de campo magnético que atraviesa una espira.

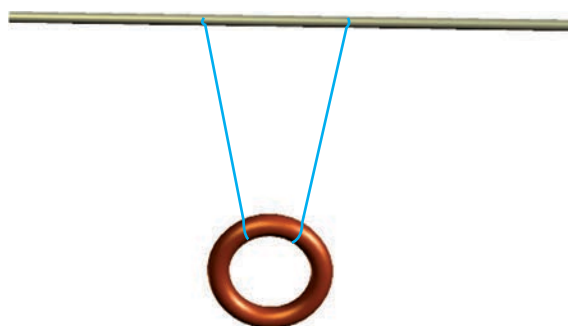


4.9.4. Actividades de repaso.

1. Comenzando con el término inducción electromagnética, confecciona un diagrama que conecte conceptos e ideas como los siguientes: experimentos de Faraday, ley de inducción electromagnética, flujo de campo magnético, fem, ley de Lenz, campo eléctrico rotacional, aplicaciones de la inducción electromagnética, autoinducción, inductancia, onda electromagnética.
2. Responde, resumidamente, las preguntas formuladas al inicio del capítulo: ¿Cómo obtener corriente eléctrica a partir del magnetismo? ¿Cuáles son algunos de los desarrollos tecnológicos más relevantes que hizo posible el estudio de este fenómeno? ¿En qué consiste una onda electromagnética?
3. Explica e ilustra mediante ejemplos las características básicas de: a) las experiencias realizadas por Faraday, b) el concepto de flujo de campo magnético, c) la ley de inducción electromagnética, d) el campo eléctrico rotacional, e) la fem de movimiento, f) el fenómeno de la autoinducción, g) el concepto de inductancia, h) la onda electromagnética i) los materiales ferromagnéticos.
4. Explica el principio físico básico de: a) el generador de inducción electromagnética, b) la bocina electrodinámica, c) la lectura de materiales magnéticos.
5. Considera una espira conductora en un campo magnético uniforme. ¿De qué formas podría a) trasladarse, b) rotar, sin que se induzca una fem en ella?
6. En el esquema de la figura, ¿cuál es el sentido de la corriente inducida en el anillo conductor: a) al cerrar el interruptor, b) luego de varios segundos de cerrado, c) al abrir el interruptor?

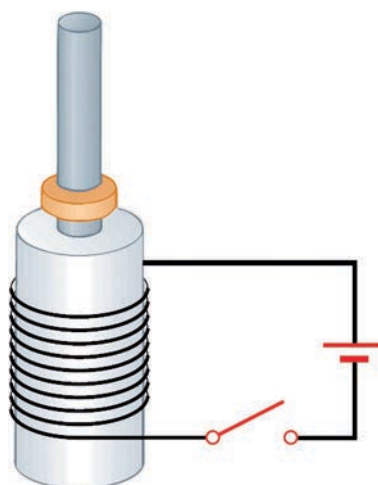


7. Se tiene un anillo de cobre suspendido de dos hilos, como se muestra en la figura. ¿Qué sucede si se aproxima rápidamente un imán recto al anillo, moviéndolo como si se fuera a introducir en él? ¿Y si el imán se mueve alejándolo del anillo? Argumenta tus respuestas.

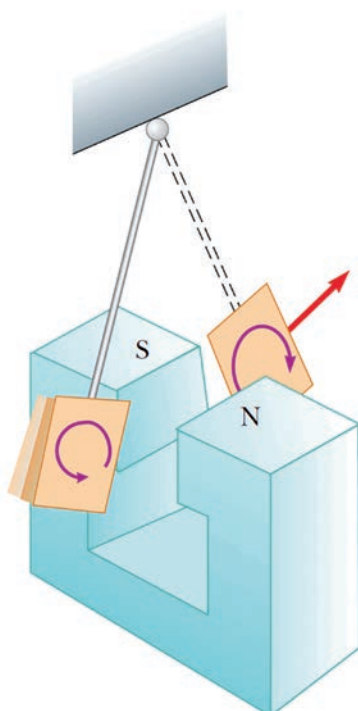


8. Indaga en una enciclopedia o en Internet acerca del funcionamiento de la guitarra eléctrica.

9. Una bobina tiene un largo núcleo de hierro en el cual se ha introducido un anillo de cobre. Al cerrar el interruptor, el anillo se eleva bruscamente y luego cae. ¿Cómo se explica esto?



10. Una lámina de aluminio cuelga en forma de péndulo entre los polos de un imán de herradura. Cuando la lámina oscila pasando entre los polos del imán, sus oscilaciones se amortiguan mucho más rápidamente que cuando no está el imán. Explica por qué.





11. Si la lámina de aluminio de la actividad anterior se ranura como se muestra en la figura, entonces el amortiguamiento de las oscilaciones es mucho menor. Explica.
12. ¿Con qué propósito las espiras de los generadores de inducción se enrollan alrededor de un material ferromagnético?
13. ¿Cómo se explica, teniendo en cuenta la ley de inducción electromagnética, el aumento de la intensidad luminosa del bombillo de una bicicleta al incrementar la velocidad?
14. Describe las transformaciones de energía que tienen lugar mientras funciona el generador de inducción de una bicicleta.
15. ¿Qué relación hay entre el funcionamiento de un transformador y el primero de los experimentos de inducción electromagnética realizado por Faraday?
16. Los núcleos de los transformadores no están formados por una pieza entera, sino por una serie de láminas, aisladas eléctricamente entre sí mediante un barniz no conductor. ¿Por qué los núcleos se construirán de ese modo? (Apóyate en las respuestas a las actividades 10 y 11).
17. ¿En qué fenómeno físico se apoya el elevado voltaje que se obtiene en las bujías de los carros mediante el empleo de una bobina?
18. Una bobina de gran inductancia almacena una energía considerable mientras está pasando corriente eléctrica por ella. ¿A dónde va a parar esa energía cuando se abre el interruptor del circuito de la bobina?
19. ¿Por qué para comprender lo que es una onda electromagnética no basta con la ley de inducción de Faraday y se requiere tener en cuenta, además, la conclusión de Maxwell de que un campo eléctrico variable origina un campo magnético?
20. Los motores de algunos equipos, como por ejemplo los de las licuadoras, emplean conmutadores que cierran y abren el circuito de sus bobinas periódicamente, ¿por qué al ponerlos a funcionar cerca de un radio se producen interferencias?



4.9.5. Ejercicios de repaso.

1. Un pequeño imán recto se desplaza en el interior de un solenoide a lo largo de su eje. ¿Qué fem induce en el solenoide? Argumenta tu respuesta.

Respuesta: no se induce fem

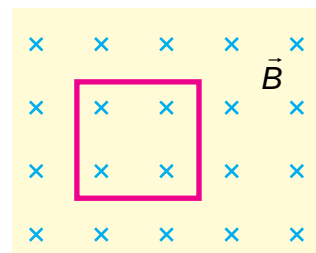
2. Se deja caer un imán cilíndrico por el interior de un largo tubo de cobre. Si la resistencia del aire al movimiento del imán puede despreciarse, ¿caerá con una aceleración mayor, igual o menor que la de la gravedad? Argumenta tu respuesta. Sugerencia: puedes apoyarte en la ley de conservación de la energía.

Respuesta: menor

3. Un avión vuela sobre Alaska horizontalmente, ¿qué ala tendrá mayor cantidad de electrones, la de la derecha de los pasajeros que están sentados, o la de la izquierda? Argumenta.

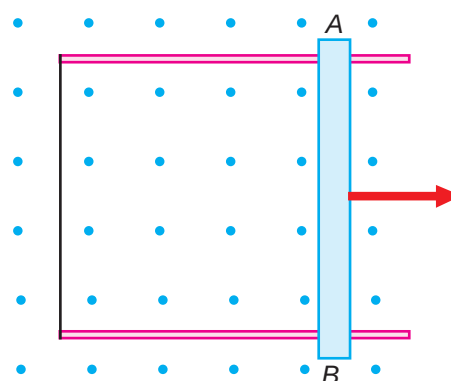
Respuesta: la derecha.

4. Considera la bobina del ejemplo 4.1 (100 espiras cuadradas, de 10 cm de lado). Ahora la bobina no se desplaza, pero el valor del campo magnético disminuye uniformemente de 1.5 T a 0 T en 0.50 s. a) Calcula la magnitud de la fem inducida en la bobina y compara el resultado con el obtenido en el ejemplo 4.1. b) ¿Cuál es el sentido de la corriente inducida? Comenta los fenómenos que originan la fem inducida en el caso del ejemplo 4.1 y en éste.



Respuesta: a) - 3.0 V, b) sentido horario.

5. Se tienen dos rieles y un conductor AB de longitud 10 cm que puede deslizar sobre ellos, en un campo magnético uniforme de 1.5 T. El circuito formado por el conjunto se cerró mediante un alambre. Se tira del conductor AB de modo que se mueve uniformemente a 0.20 m/s. Determina: a) la fem inducida en el conductor, b) la intensidad de corriente en el circuito, si su resistencia eléctrica es 1.5 Ω , c) el sentido de la corriente.

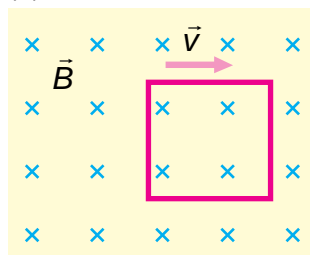


Respuesta: a) 0.030 V, b) 0.020 A, c) sentido horario.

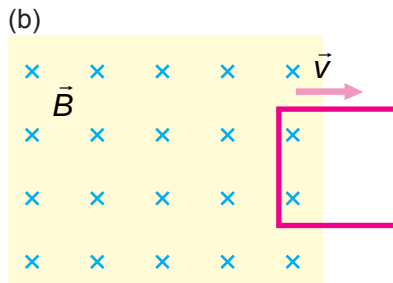


6. Considera que la espira de la figura es cuadrada, de 10 cm de lado y que el campo magnético es uniforme y de 0.40 T. a) ¿Cuál es la magnitud de la fem promedio inducida en la espira, al pasar de la posición (a) a la posición (b), si demora 0.10 s en hacerlo?

Respuesta: 0.040 V



7. Los motores eléctricos constan de una serie de bobinas, que están en reposo cuando comienza a pasar corriente eléctrica por ellas pero que luego rotan a gran velocidad. Cuando las bobinas están rotando, en ellas se induce una fem de movimiento de sentido contrario que la corriente en sus espiras. Considera un motor de 110 V en que la resistencia eléctrica total de sus bobinas es $15\ \Omega$ y en el que la fem de movimiento que se opone a la corriente es de 60 V. Encuentra la intensidad de corriente en las bobinas: a) en el instante que se enciende el motor, b) cuando alcanza su máxima velocidad. A partir de los resultados obtenidos, explica por qué si un motor eléctrico que no puede rotar, si se enciende, se quema, o al menos se calienta mucho.



Respuesta: a) 7.3 A, b) 3.3 A

Cierto radio funciona con un transformador reductor de 220 V a 9.0 V. Si la intensidad

8. de corriente en el primario del transformador es 15 mA, ¿cuál es la intensidad de corriente a la entrada del radio? Considera que el transformador es ideal.

Respuesta: 0.37 A

- Una bobina se conecta en un circuito como en el esquema de la figura 4.17. El interruptor se cierra durante varios segundos y luego se abre. Si la capacidad del condensador es $1.0\ \mu\text{F}$ y al abrir el circuito la máxima indicación del voltímetro fue 20.0 V, ¿qué energía almacenaba la bobina mientras pasaba corriente eléctrica por ella? Desprecia las pérdidas por calentamiento en el circuito.

Respuesta: $2.0 \times 10^{-4}\ \text{J}$

- Considera que la resistencia eléctrica de la bobina del ejercicio anterior es $4.0\ \Omega$ y la fem de la fuente 1.5 V. ¿Cuál es la inductancia de la bobina? La resistencia interna de la fuente es despreciable.

Respuesta: $2.8 \times 10^{-3}\ \text{H}$

5

Actividades prácticas





Actividades prácticas.

Las actividades prácticas son parte esencial del aprendizaje de la Física. Durante ellas se enriquecen con experiencia concreta determinados conocimientos y se obtienen otros; se aprende a razonar a partir de condiciones reales; se desarrollan habilidades para la medición, el manejo de instrumentos y el procesamiento e interpretación de datos; se gana experiencia en la elaboración de informes acerca del trabajo realizado. En resumen, se adquieren conocimientos, habilidades y métodos de trabajo que no es posible obtener mediante otras actividades. A continuación se incluye un conjunto de actividades prácticas de **Electromagnetismo**, estrechamente relacionadas con el material del texto. Se han agrupado en dos apartados, en el primero se proponen actividades sencillas, que pueden ser realizadas en la casa o el aula. Éstas no exigen realizar mediciones precisas ni evaluar la incertidumbre de los resultados. Su objetivo fundamental es utilizar los conceptos básicos estudiados para analizar reflexivamente diversas situaciones prácticas, así como desarrollar algunas habilidades. El segundo apartado está dedicado a las prácticas de laboratorio, las cuales, como su nombre indica, deben ser realizadas en el laboratorio, con el instrumental adecuado. En varias de ellas se presta especial atención a las mediciones y a la evaluación de la incertidumbre de los resultados.

5.1. Actividades prácticas para la casa o el aula.

1. Repulsión electrostática. Recorta dos tiras rectangulares de una bolsa de productos. a) Sitúa las tiras sobre la mesa, una al lado de la otra y frótalas repetidas veces con un dedo. Tómalas por un extremo e intenta aproximarlas entre sí. ¿Cómo se explica lo sucedido?

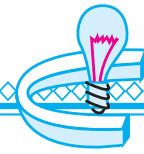


2. *Explicación microscópica de fenómenos electrostáticos.* Cuelga un pedazo de papel metálico (de unos 2 cm de largo por 2 cm de ancho) de un hilo aislante. A continuación frota intensamente una regla plástica con papel. Describe y explica desde el punto de vista microscópico lo que sucede cuando: a) se aproxima la regla plástica al papel metálico, b) el papel metálico es tocado con la regla plástica y luego ésta se aproxima nuevamente al papel, c) permaneciendo el papel metálico desviado de su posición de equilibrio a causa de la repulsión de la regla, se toca con un dedo.



3. *Rayo en miniatura.* Frota fuertemente con papel una regla de plástico o una lámina de acetato y aproxímalas poco a poco a un cuerpo metálico. Si lograste electrizar la regla intensamente, podrás escuchar un débil chasquido y en una habitación oscura pudieras incluso ver una pequeña chispa. Teniendo en cuenta la distancia que había entre la superficie de la regla y la superficie metálica cuando saltó la chispa, estima la diferencia de potencial entre ambas superficies.

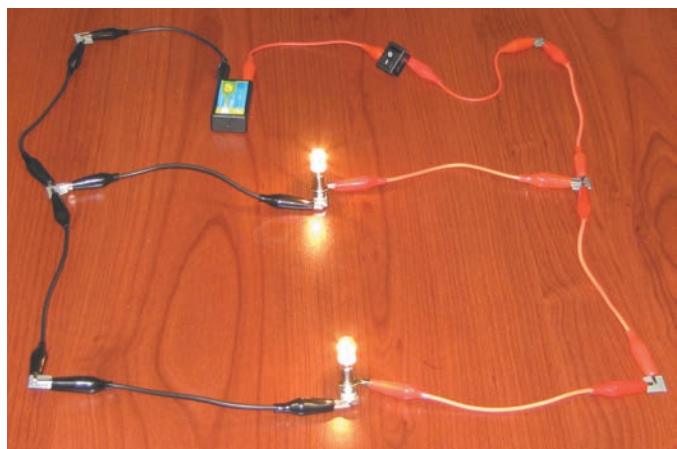




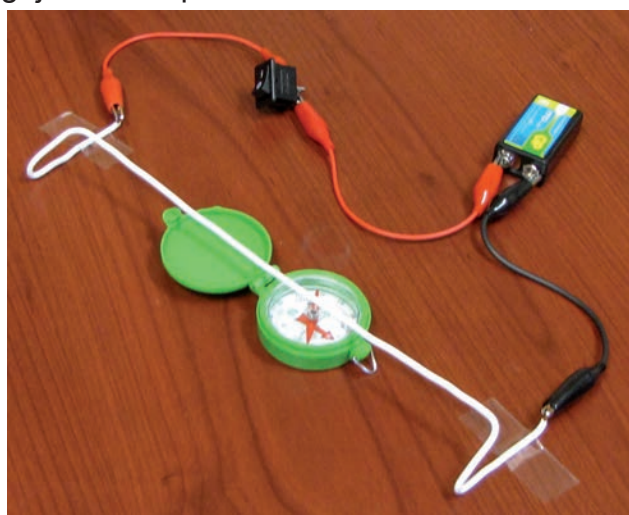
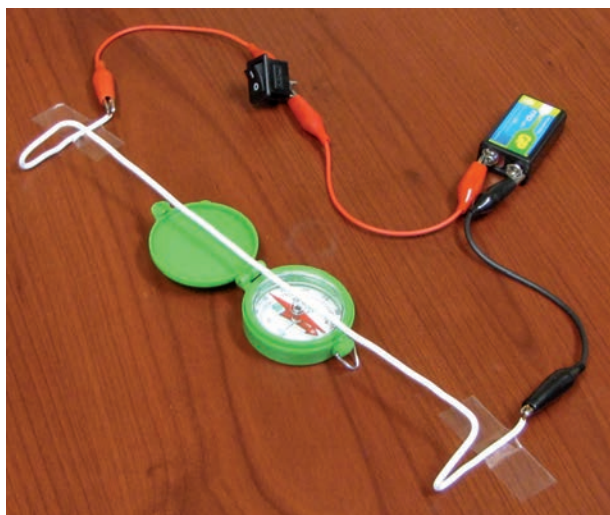
4. *Principio de separación electrostática.* Mezcla pimienta (también puedes utilizar te de una bolsita) con sal común. Frota intensamente una regla plástica y aproxímalas a la mezcla. ¿Qué sucede? El procedimiento de separación electrostática es utilizado en las chimeneas para retirar hollín del humo. Indaga en Internet sobre ello.



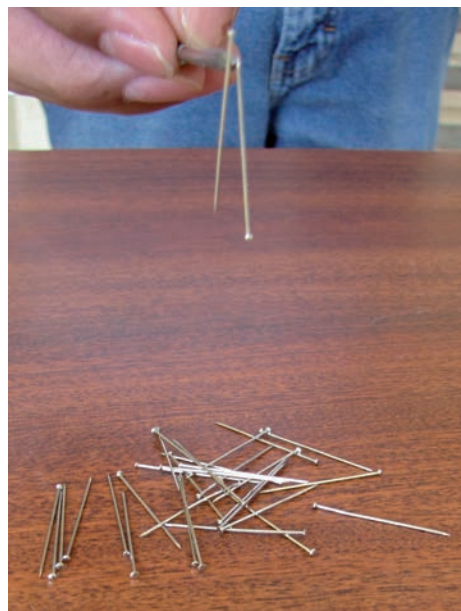
5. *Resistores en serie y en paralelo.* Procura dos pequeños bombillos con sus soportes (sockets), una pila y 10 cables de conexión (también puedes utilizar pedazos de alambre eléctrico). Forma circuitos en que los bombillos estén conectados en serie y en paralelo. ¿En qué caso la intensidad luminosa de los bombillos es mayor? Asegúrate que el voltaje de la pila utilizada no sobrepase el indicado en los bombillos, de lo contrario éstos podrían fundirse.



6. *Experimento de Oersted*. Consigue una brújula, una pila eléctrica y un alambre de cobre. En un lugar donde no haya objetos ferrosos deja que la aguja de la brújula se oriente en el campo magnético de la Tierra. A continuación coloca un tramo del alambre encima de la aguja de la brújula, paralelo a ella. Por un instante haz contacto entre los extremos del alambre y los de la pila, de modo que el circuito se cierre. Identifica el sentido del campo magnético de la Tierra y el de la corriente en el alambre. Utiliza la regla de la mano derecha para determinar el sentido del campo magnético originado por la corriente. Verifica si la desviación de la aguja es la esperada.



7. *Magnetización*. Consigue un clavo y un imán. Desliza el imán a lo largo del clavo, apoyado sobre él. Comprueba si el clavo se ha magnetizado, aproximándolo a alfileres o agujas. Luego golpea el clavo repetidas veces con un martillo y verifica nuevamente su magnetización. Explica la magnetización y desmagnetización del clavo desde el punto de vista microscópico.





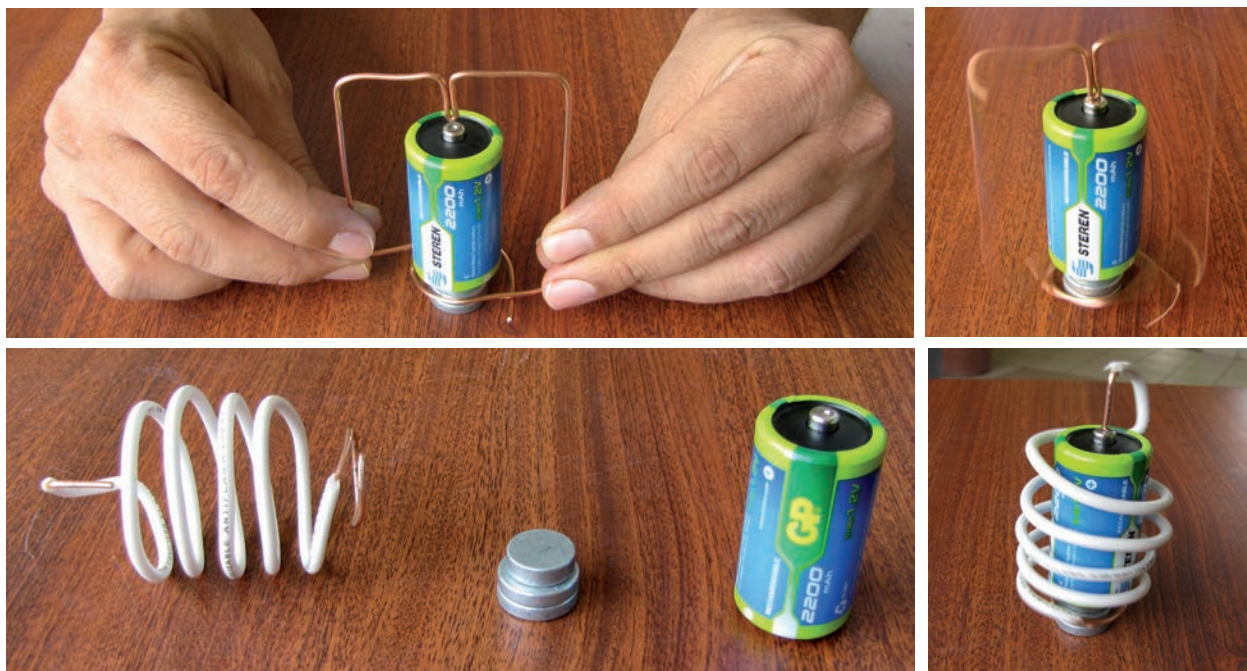
8. *Materiales magnéticos.* Procura un pedazo del material de un disco fte de computadora ya inservible. Acércale un potente imán y observa lo que sucede. ¿Cómo se explica?



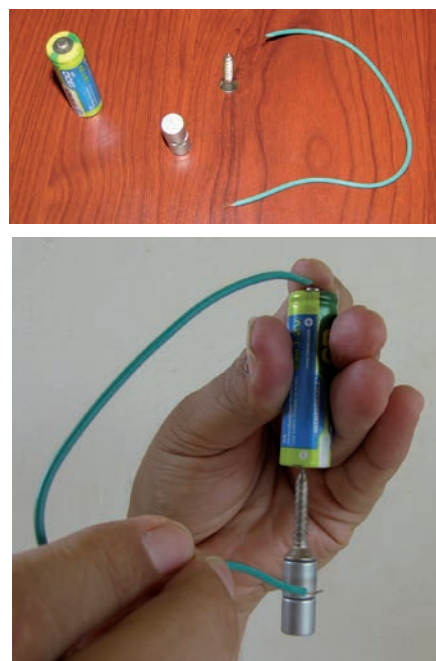
9. *Fuerza de Ampere.* Pega un pequeño imán en el costado de un pila eléctrica y luego conecta un pedazo de alambre de cobre grueso, como se muestra en la foto. En dependencia del sentido de la corriente y del campo magnético, el alambre puede elevarse. ¿Cómo se explica esto?



10. Fuerza de Ampere y motor homopolar (1). Las dos fotos que siguen muestran los materiales necesarios (una pila eléctrica, un imán y alambre de cobre) y el conjunto ya armado. ¿Cómo se explica la rotación del marco formado por el alambre? Corta el alambre en el lado derecho o izquierdo del marco, de modo que deje de pasar corriente por esa rama. ¿Continúa rotando el marco? ¿Cómo se explica? Puedes ensayar otras variantes, cambiando la forma del alambre. A modo de ejemplo, en las otras dos fotos se muestra una de esas variantes.



11. Fuerza de Ampere y motor homopolar (2). La foto aclara en qué consiste esta otra variante de motor homopolar. Como puedes apreciar, necesitas una pila eléctrica, un tornillo, un imán y un cable para la conexión. Al conectar el cable como se indica, el tornillo con los imanes comienza a rotar. ¿Qué sucede con el sentido de rotación cuando se invierte la polaridad del imán? A partir de la dirección y sentido del campo magnético del imán y del sentido de la corriente en éste, determina la dirección y sentido de la fuerza de Ampere que hace rotar al tornillo.

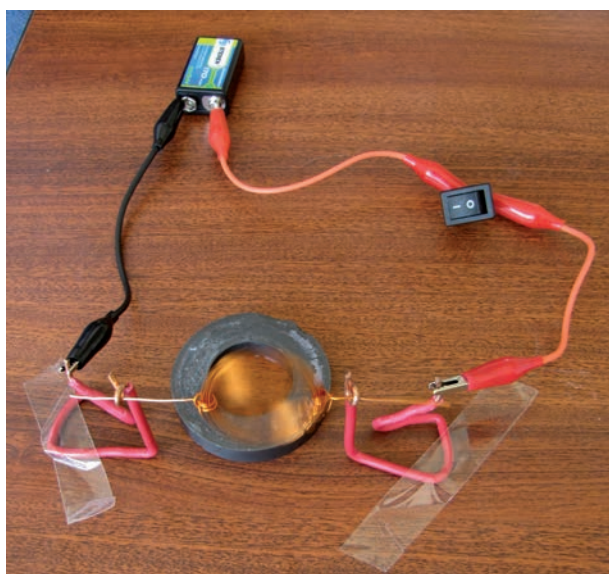
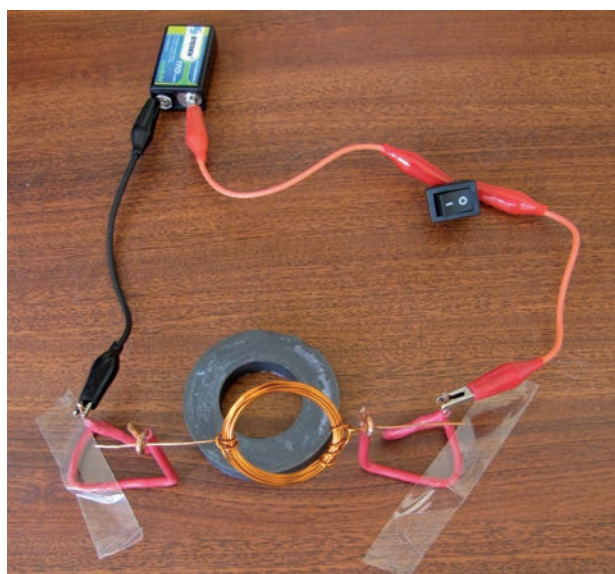




12. Fuerza de Lorentz en un electrólito. En la foto de arriba se muestra lo necesario: un fuerte imán, una pila eléctrica, dos trozos de alambre grueso de cobre, una taza, sal y pimienta. Vierte un poco de agua en la taza, añade la sal, la pimienta y revuelve. Luego añade otro poco de pimienta a la superficie del agua. Coloca la taza sobre el imán y forma un circuito eléctrico, como se muestra en la foto de abajo. Lo mejor es introducir uno de los alambres en la zona central y el otro en el borde. Observa lo que sucede. Luego, sucesivamente, invierte la polaridad del imán y el sentido de la corriente y observa el sentido del movimiento de las partículas de pimienta. ¿Cuáles son las funciones de la sal y la pimienta? ¿Por qué es conveniente emplear alambres bien gruesos? ¿Cómo se explica el fenómeno observado? A partir de la dirección y el sentido del campo magnético y del sentido de la corriente eléctrica en el electrólito, determina la dirección y el sentido de la fuerza que hace rotar el líquido.

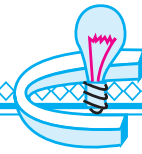


13. Modelo de motor eléctrico clásico. Consigue un alambre con barniz aislante, de alrededor de 1 mm de diámetro y 1.5 m de largo. Forma una bobina de unas diez espiras, enrollando el alambre, por ejemplo, alrededor de una pila de linterna. Usa los extremos del alambre para sujetar las espiras entre sí y para formar una especie de eje, como se muestra en la foto. Mediante una navaja, retira el barniz aislante de uno de los lados del eje. Luego apoya el otro lado del eje sobre una mesa y retira el barniz, pero ahora cuidando que solo quede sin aislante una zona semicilíndrica. Con alambre también puedes confeccionar dos pequeños soportes para apoyar el eje de la bobina. Utiliza una pila y un imán para hacer funcionar el “motor”. Explica su funcionamiento.



14. Onda electromagnética. Enciende una licuadora o una máquina de afeitar eléctrica cerca de un radio o televisión. ¿Qué sucede con lo que se escucha o se ve? Da una explicación general del fenómeno observado.





15. *áula de Faraday*. Envuelve tu celular en un papel de aluminio y haz que te llamen para comprobar si funciona. ¿Cómo se explica el resultado?





5.2. Prácticas de laboratorio.

Un aspecto central de las prácticas de laboratorio que aparecen a continuación es, indudablemente, el manejo de ciertos instrumentos y la realización de mediciones. Pero las prácticas no se reducen a ello.

Otro importante aspecto consiste en la preparación previa de los estudiantes para el trabajo en el laboratorio. Durante esa preparación deben comprender la problemática que abordarán y el objetivo de la práctica, saber deducir las ecuaciones que utilizarán, así como conocer el contenido del trabajo a realizar.

No menos importante que todo lo anterior es la labor posterior a la sesión de trabajo en el laboratorio: cálculos, evaluación de la incertidumbre de los resultados, construcción de gráficas, respuestas a las preguntas formuladas y, finalmente, la elaboración del informe o reporte de la práctica.

En general, el **informe de cada práctica** debe constar de tres partes fundamentales: una, donde se expone la problemática abordada en la práctica y su objetivo; otra, donde se recogen los resultados de las mediciones realizadas, se explica cómo se realizó el cálculo de la incertidumbre de dichos resultados, se presentan (en los casos que corresponda) los gráficos y se responden las preguntas formuladas; la última parte del informe consiste en unas breves conclusiones donde se da una valoración de los resultados obtenidos y del procedimiento empleado y se proponen variantes para mejorar el trabajo.





5.2.1. Característica voltampérica de un resistor. Ley de Ohm.

Materiales e instrumentos: fuente, resistor, multímetros (2), potenciómetro, interruptor, cables de conexión.

Medidas de seguridad importantes:

1. Tener sumo cuidado al operar con el multímetro preparado para trabajar como amperímetro, de lo contrario puedes provocar su rotura, nunca lo conectes en paralelo a los dispositivos del circuito.
2. No energizar el circuito hasta que el maestro haya revisado las conexiones.

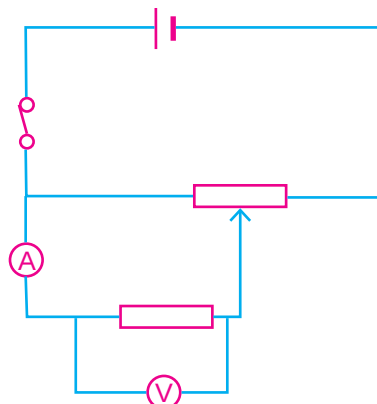
La dependencia entre la intensidad de corriente I en un dispositivo y el voltaje V entre sus terminales se denomina **característica voltampérica** del dispositivo. Si esta dependencia es de proporcionalidad, como por ejemplo para un conductor metálico cuya temperatura no varía, el dispositivo cumple con la ley de Ohm y se dice que es **óhmico**.



Ohm trabajó con conductores metálicos y fue para tales conductores que estableció la ley que hoy lleva su nombre. La resistencia eléctrica de un dispositivo es $R = V/I$, y como para los dispositivos óhmicos dicho cociente es constante, ello significa que la resistencia eléctrica también lo es. Los dispositivos específicamente diseñados para que cumplan con la ley de Ohm se demoniman **resistores**.

El **objetivo** básico de esta práctica es obtener el gráfico de la característica voltampérica de un resistor y determinar su resistencia eléctrica.

1. Familiarízate con las escalas de los multímetros y prepara uno para medir voltaje y el otro para medir intensidad de corriente. Luego monta el circuito eléctrico según el esquema de la figura. Observa que el potenciómetro se conecta en forma de divisor voltaje. Esto permite variar poco a poco el voltaje en los terminales del resistor, desde un pequeño valor hasta un valor dado.





2. Prepara una tabla de 2 columnas y unas 10 filas, para anotar los valores de voltaje e intensidad de corriente. Gira el botón del potenciómetro, de modo que el voltaje en los terminales del resistor sea 0 V. Realiza mediciones de voltaje e intensidad de corriente, aumentando el voltaje a intervalos de 0.20 V hasta llegar a 2.0 V. Anota los valores de V e I en la tabla.



V (V)	I (A)

3. Introduce los valores de V e I en una hoja de cálculo y construye el gráfico de I en función de V . ¿Es la intensidad de corriente proporcional al voltaje? ¿Se cumple la ley de Ohm? Argumenta.

4. A partir de los valores máximos anotados para V e I , calcula la resistencia eléctrica del resistor y expresa el resultado con su incertidumbre relativa.

V	$u(V)$	$u(V)/V$

I	$u(I)$	$u(I)/I$

Puesto que $R = \frac{V}{I}$, la fórmula para determinar la incertidumbre relativa de R es:

$$\frac{u(R)}{R} = \sqrt{\left(\frac{u(V)}{V}\right)^2 + \left(\frac{u(I)}{I}\right)^2}$$

El maestro te informará acerca de las incertidumbres del voltaje $u(V)$ y de la intensidad de corriente $u(I)$.

R	$u(R)/R$	$u(R)$

5. Compara el resultado obtenido con el valor de resistencia reportado por el fabricante.



5.2.2. Característica voltampérica del filamento de un bombillo.

Materiales e instrumentos: fuente, bombillo de linterna, multímetros (2), potenciómetro, interruptor, cables de conexión.

Medidas de seguridad importantes:

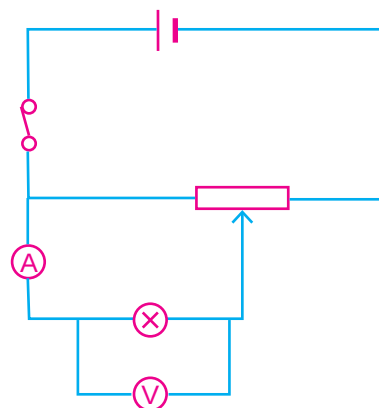
1. Tener sumo cuidado al operar con el multímetro preparado para trabajar como amperímetro, de lo contrario puedes provocar su rotura, nunca lo conectes en paralelo a los dispositivos del circuito.
2. No energizar el circuito hasta que el maestro haya revisado las conexiones.

En la práctica anterior trabajaste con un resistor, el cual cumple con la ley de Ohm, pero la mayoría de los dispositivos electrónicos modernos no son óhmicos. Incluso el filamento de un bombillo de incandescencia, aún siendo metálico, no cumple con la ley de Ohm, porque al pasar corriente eléctrica por él su temperatura puede elevarse a más de 2 000 °C.



El **objetivo** básico de esta práctica es obtener el gráfico de la característica voltampérica de un bombillo de filamento incandescente.

1. Prepara uno de los multímetros para medir voltaje y el otro para medir intensidad de corriente. Luego monta el circuito eléctrico según el esquema de la figura.



2. Dibuja una tabla de 2 columnas y unas 10 filas, para anotar los valores de voltaje e intensidad de corriente. Gira el botón del potenciómetro, de modo que el voltaje en los terminales del resistor sea 0 V. Realiza mediciones de voltaje e intensidad de corriente, aumentando el voltaje a intervalos de 0.10 V, hasta apreciar una tenue luz en el bombillo. Anota los valores de V e I en la tabla.



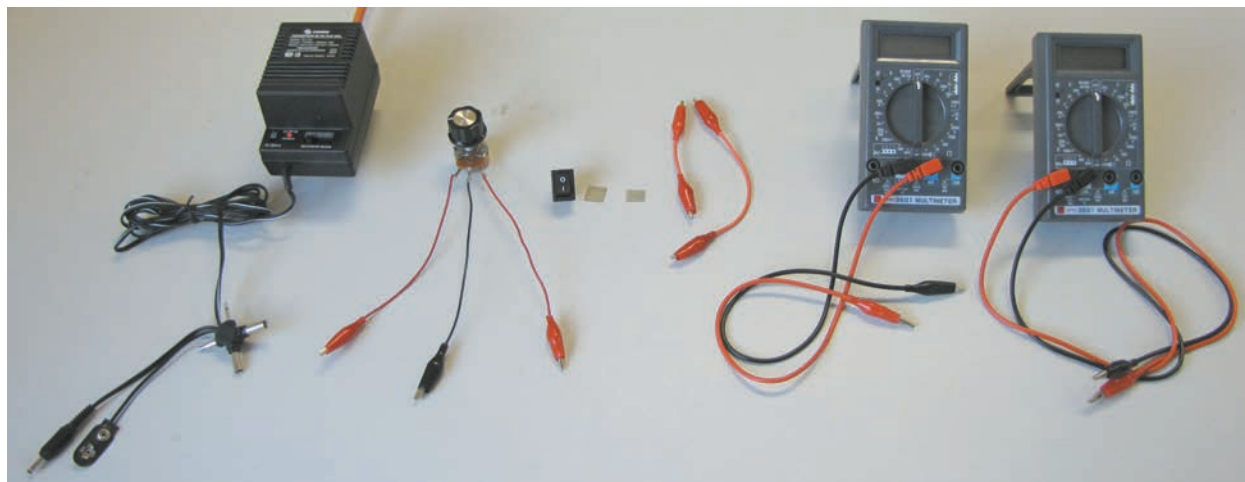
V (V)	I (A)

3. Introduce los valores de V e I en una hoja de cálculo y construye el gráfico de I en función de V . ¿Es la intensidad de corriente proporcional al voltaje? ¿Se cumple la ley de Ohm? Argumenta.
4. Utilizando los datos de la tabla, calcula la resistencia eléctrica del bombillo para 1.50 V y luego para el máximo voltaje que mediste. Dispón uno de los multímetros para trabajar como ohmímetro y mide con él la resistencia del filamento del bombillo. ¿Por qué ninguno de los 3 resultados coincide?



5.2.3. Medición de la fem y la resistencia interna de una fuente de energía eléctrica.

Materiales e instrumentos: fuente, multímetros (2), potenciómetro, interruptor, cables de conexión.



Medidas de seguridad importantes: 1. Tener sumo cuidado al operar con el multímetro preparado para trabajar como amperímetro, de lo contrario puedes provocar su rotura, nunca lo conectes en paralelo a los dispositivos del circuito. 2. No energizar el circuito hasta que el maestro haya revisado las conexiones.

Todas las fuentes de energía eléctrica poseen cierta resistencia eléctrica. En particular, en el interior de una pila, las partículas cargadas se mueven contra la resistencia que les presentan los átomos y moléculas entre los que se desplazan. De este modo, cualquier circuito eléctrico tiene una resistencia eléctrica externa a la fuente (R) y otra interna de ella (r).

La fem ε de una fuente representa la energía, por unidad de carga acumulada en sus terminales, que se transforma de algún otro tipo de (química, mecánica, luminosa, etc.), en energía potencial eléctrica. Cuando por el circuito pasa corriente, una parte de ella es utilizada en los diferentes dispositivos del circuito (bombillo, calentador, motor, etc.) y otra parte, Ir , va a parar a energía térmica dentro de la fuente. Si el circuito consta solo de un resistor de resistencia R , entonces en su porción externa la energía transformada es IR . En este caso, el balance entre la energía que entrega la fuente y la que se transforma en energía térmica en su porción externa y en el interior de la pila es:

$$\varepsilon = IR + Ir$$

Puesto que IR es el voltaje en los terminales del resistor, puede escribirse:

$$\varepsilon = V + Ir$$





De aquí que: $r = \frac{\varepsilon - V}{I}$

A partir de esta ecuación y midiendo la fem ε de la fuente, el voltaje V en los terminales del resistor y la intensidad de corriente I en el circuito, puede determinarse la resistencia interna r de la fuente.

El **objetivo** fundamental de la práctica consiste en determinar la fem y la resistencia interna de una fuente siguiendo el procedimiento descrito. También se evaluará la incertidumbre de los resultados.

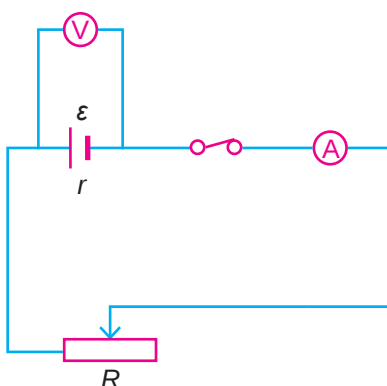
1. La ecuación $\varepsilon = IR + Ir$ puede escribirse $\varepsilon = I(R + r)$. Esto hace evidente que si a los terminales de la fuente conectamos solo un voltímetro, éste mide su fem. En efecto, las resistencias internas de las fuentes suelen ser muy pequeñas comparadas con las de los voltímetros, pueden ser miles y hasta millones de veces menor. Por eso, $r \ll R$ y $\varepsilon \approx IR = V$. Es decir, la fem ε es igual al voltaje V indicado por el voltímetro.

Dispón uno de los multímetros para medir voltaje y mide la fem de la fuente. Expresa el resultado con su incertidumbre, que en este caso es la debida al instrumento. El maestro te informará acerca de ella.

ε	$u(\varepsilon)$	$u(\varepsilon)/\varepsilon$



2. Prepara el otro multímetro para medir intensidad de corriente y luego monta el circuito según el esquema de la figura. En este caso utilizarás el potenciómetro como resistencia variable, para lo cual conectarás solo dos de sus terminales, el de un extremo y el central.





Gira el botón del potenciómetro hacia la posición de máxima resistencia. Cierra el circuito y observa cómo al girar lentamente el botón del potenciómetro, disminuyendo su resistencia, el voltaje indicado por el voltímetro también va disminuyendo. Ten cuidado de no disminuir demasiado la resistencia del potenciómetro, porque la corriente pudiera llegar a ser tan grande que se rompa. Solo lo harás hasta que el voltaje indicado por el voltímetro disminuya varias décimas de volt. ¿Cómo se explica la diferencia entre la indicación del voltímetro con el interruptor abierto y cerrado?

Mide el voltaje V y la intensidad de corriente I y expresa los resultados con sus incertidumbres. Éstas son las de los instrumentos.

V	$u(V)$	$u(V)/V$

I	$u(I)$	$u(I)/I$

3. Utiliza la ecuación: $r = \frac{\varepsilon - V}{I}$ para determinar la resistencia interna de la pila.

La incertidumbre relativa de r es:

$$\frac{u(r)}{r} = \sqrt{\left(\frac{u(\varepsilon - V)}{(\varepsilon - V)}\right)^2 + \left(\frac{u(I)}{I}\right)^2}$$

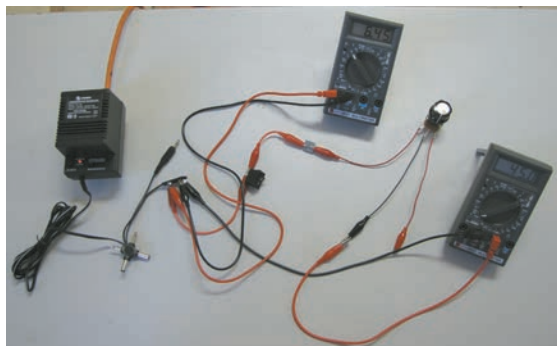
$\varepsilon - V$	$u(\varepsilon - V)$	$u(\varepsilon - V)/(\varepsilon - V)$

Por su parte:

$$u(\varepsilon - V) = \sqrt{(u(\varepsilon))^2 + (u(V))^2}$$

r	$u(r)/r$	$u(r)$

$r = (\quad \pm \quad) \Omega$





Actividad complementaria. Una variante para determinar la resistencia interna consiste en suprimir el amperímetro del circuito anterior y utilizar un resistor de resistencia conocida en lugar del potenciómetro, por ejemplo de 5.6Ω . Nota que en la variante anterior la resistencia del potenciómetro era desconocida. Por eso, para poder determinar la intensidad de corriente I que aparece en la ecuación $r = (\varepsilon - V)/I$ se requirió emplear el amperímetro. Pero ahora no conocemos el valor de I , sino el de R . Transformemos la ecuación de trabajo.

Sustituyendo la expresión $I = \frac{V}{R}$ en la ecuación:

$$r = \frac{\varepsilon - V}{\frac{V}{R}} = \frac{(\varepsilon - V)R}{V}$$

De modo que ahora la ecuación de trabajo es:

$$r = \frac{(\varepsilon - V)R}{V}$$

En este caso:
$$\frac{u(r)}{r} = \sqrt{\left(\frac{u(\varepsilon - V)}{\varepsilon - V}\right)^2 + \left(\frac{u(I)}{I}\right)^2 + \left(\frac{u(R)}{R}\right)^2}$$

La incertidumbre relativa de R , $\Delta R/R$, es un dato que informa, en porciento, el fabricante del resistor. Para el resistor utilizado esta incertidumbre es mayor que las otras dos que aparecen en la ecuación, por lo que estas últimas pueden no considerarse. De modo que:

$$\frac{u(r)}{r} = \frac{u(R)}{R}$$

ε	$u(\varepsilon)$	$u(\varepsilon)/\varepsilon$

V	$u(V)$	$u(V)/V$

R	$u(R)$	$u(R)/R$

r	$u(r)/r$	$u(r)$

$r = (\quad \pm \quad) \Omega$





5.2.4. Medición de la carga del electrón.

Fuente, balanza que permita apreciar 0.01 g ó 0.001 g, multímetro, dos láminas de cobre para ser utilizadas como electrodos, interruptor, cables de conexión, solución de sulfato de cobre en agua, calentador eléctrico o plancha y cronómetro.



Medidas de seguridad importantes:

1. Evitar el contacto del sulfato de cobre con la piel y realizar la práctica en un lugar con buena ventilación.
2. Tener sumo cuidado al operar con el multímetro preparado para trabajar como amperímetro, de lo contrario puedes provocar su rotura, nunca lo conectes en paralelo a los dispositivos del circuito.
3. No energizar el circuito hasta que el maestro haya revisado las conexiones.

La corriente eléctrica en los electrólitos conlleva un **transporte de sustancia**. En los electrodos introducidos en la disolución, tiene lugar la separación de las sustancias que forman el electrólito. Si éste es una solución de sulfato de cobre en agua, en el electrodo negativo (cátodo) se deposita cobre. Midiendo la masa de cobre depositada, la intensidad de la corriente y el tiempo durante el cual ésta circula, es posible calcular la carga del electrón.

El **objetivo** de la práctica es determinar la carga del electrón, midiendo la intensidad de la corriente eléctrica que se hace pasar por una solución de sulfato de cobre en agua durante cierto tiempo y la masa de cobre que se deposita en el cátodo.

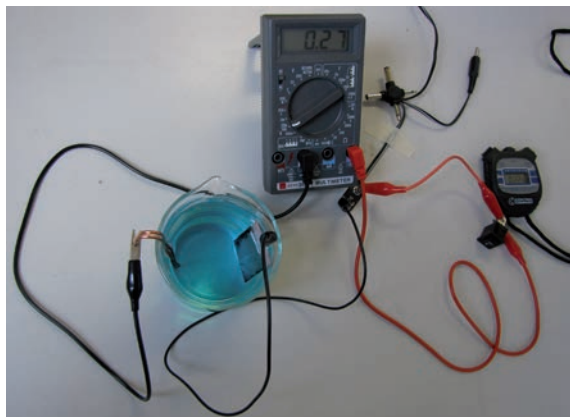
1. Estudia el apartado 2.2.2 y, de modo especial, el ejemplo resuelto 2.7, pues ello te preparará para esta práctica.





2. Limpia bien las láminas de cobre. Mide la masa de la que utilizarás como electrodo negativo (M_1). Dibuja el esquema del circuito eléctrico con todos los componentes en serie: fuente, amperímetro, interruptor y cubeta con los electrodos y la solución. Dispón el multímetro para trabajar como amperímetro.

M_1	$u(M_1)$



3. Realiza las conexiones según el esquema, pero aún sin introducir los electrodos en la solución de sulfato de cobre y cuidando que el electrodo cuya masa mediste sea el negativo.



4. Introduce los electrodos en la solución. Ajusta el voltaje de la fuente para que la intensidad de corriente en el circuito esté en el rango 0.25 A - 0.30 A. Deja pasar corriente durante unos 25 min. Debes medir este tiempo. Estima la incertidumbre en el valor de la intensidad de corriente en el circuito.

I	$u(I)$	$u(I)/I$

t (s)

5. Extrae la lámina de cobre utilizada como cátodo, sécala colocándola sobre una hornilla o plancha caliente y mide nuevamente su masa (M_2). Calcula la masa de cobre depositada en la lámina ($M = M_2 - M_1$) y expresa el resultado con su incertidumbre.

M_2	$u(M_2)$

M	$u(M)/M$	$u(M)$

La incertidumbre de M es:

$$u(M) = \sqrt{[u(M_2)]^2 + [u(M_1)]^2}$$

$$M = (\quad \pm \quad) \text{ g}$$



6. Para determinar la carga del electrón utiliza la fórmula:

$$e = \frac{mIt}{nM}$$

En esta fórmula, m es la masa de un átomo de cobre ($1.05 \times 10^{-25} \text{ kg}$), n su valencia (2), I la intensidad de corriente, t el tiempo durante el cual estuvo circulando y M la masa de cobre depositada.

7. Calcula las incertidumbres relativa y absoluta del resultado. En este caso la fórmula para la incertidumbre relativa es:

$$\frac{u(e)}{e} = \sqrt{\left(\frac{u(m)}{m}\right)^2 + \left(\frac{u(I)}{I}\right)^2 + \left(\frac{u(t)}{t}\right)^2 + \left(\frac{u(M)}{M}\right)^2}$$

Sin embargo, las incertidumbres relativas en los resultados de las mediciones de la intensidad de corriente y de la masa de cobre depositada son mucho mayores que las otras. Por eso, despreciando el primer y tercer término del radicando queda:

$$\frac{u(e)}{e} = \sqrt{\left(\frac{u(I)}{I}\right)^2 + \left(\frac{u(M)}{M}\right)^2}$$

e	$u(e)/e$	$u(e)$

$e = (\text{_____} \pm \text{_____}) \text{ C}$

8. Compara el resultado obtenido con el valor reconocido para la carga del electrón.



5.2.5. Conexión de conductores en serie y en paralelo. Acoplamiento de circuitos simples.

Materiales e instrumentos: fuente, resistores (2), multímetros (2), interruptor, cables de conexión.

Medidas de seguridad importantes:

1. Tener sumo cuidado al operar con el multímetro preparado para trabajar como amperímetro, de lo contrario puedes provocar su rotura, nunca lo conectes en paralelo a los dispositivos del circuito. 2. No energizar el circuito hasta que el maestro haya revisado las conexiones.

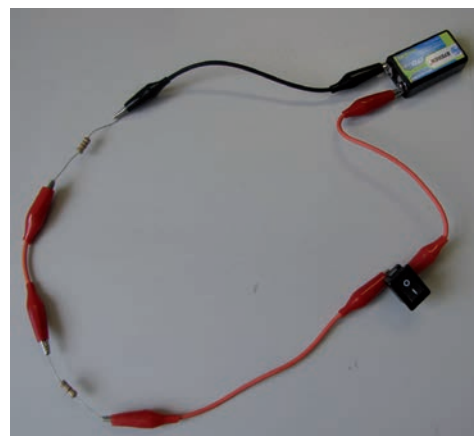


Dos de la formas más simples de conectar los dispositivos en los circuitos son las denominadas en **serie** y en **paralelo** (Fig. 2.33). En la primera, la intensidad de corriente es la misma en todos los dispositivos y el voltaje en los extremos del circuito es igual a la suma de los voltajes en los terminales de cada uno de ellos. En la segunda, el voltaje es el mismo en los terminales de todos los dispositivos y la intensidad de corriente en la parte no ramificada del circuito es igual a la suma de las intensidades en cada uno de ellos.

El **objetivo** de la práctica es verificar las características de las conexiones en serie y paralelo en el caso de dos resistores.

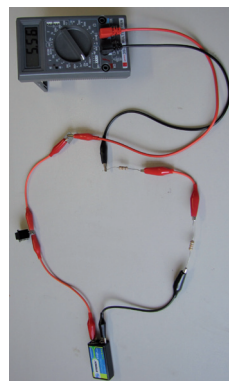
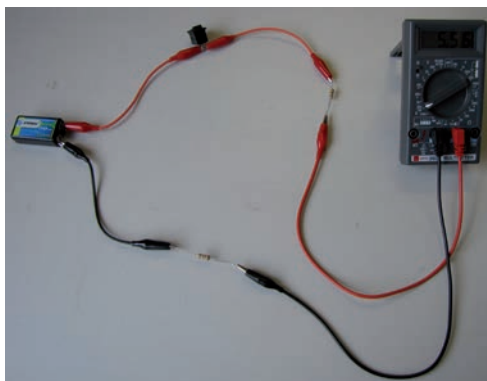
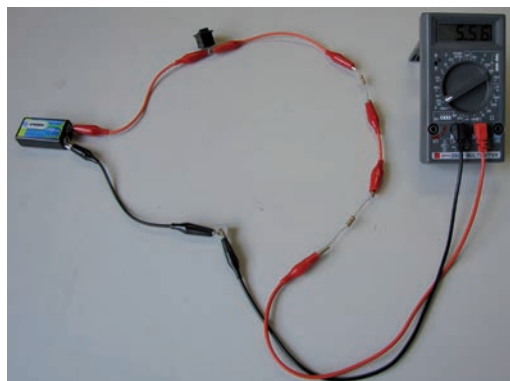
Conexión en serie.

1. Dispón uno de los multímetros para medir intensidad de corriente y el otro para medir voltaje. Dibuja el esquema del circuito con la fuente, el amperímetro y el interruptor en serie.



2. Realiza la conexión según el esquema y mide la intensidad de corriente. Cambia el amperímetro de posición y comprueba que la intensidad de corriente es la misma en todas las porciones del circuito.

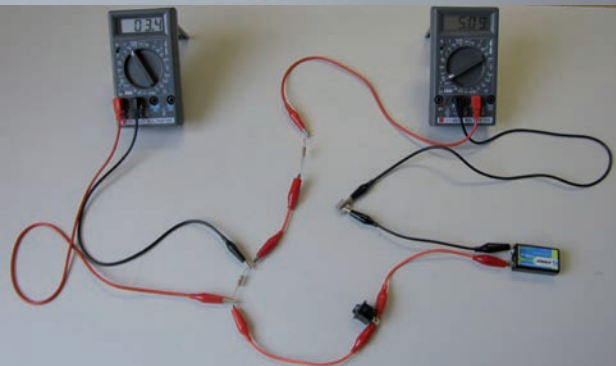
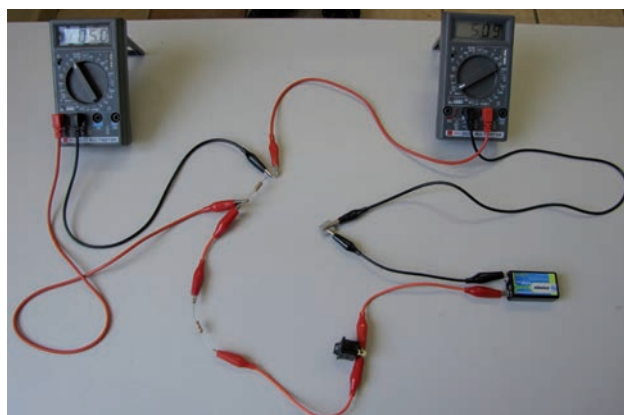
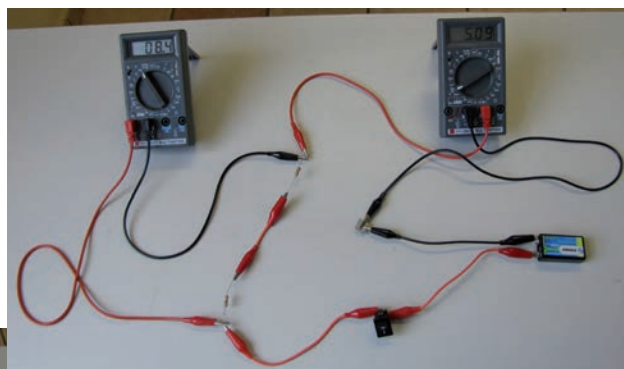




I (A)	I_1 (A)	I_2 (A)

3. Mide el voltaje entre los extremos del circuito y en los terminales de cada resistor y comprueba que:

$$V = V_1 + V_2$$



V (V)	V_1 (V)	V_2 (V)

4. A partir de los datos anteriores y utilizando la ley de Ohm, calcula la resistencia total del circuito y la de cada uno de los resistores y comprueba las siguientes ecuaciones:

$$R = R_1 + R_2$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

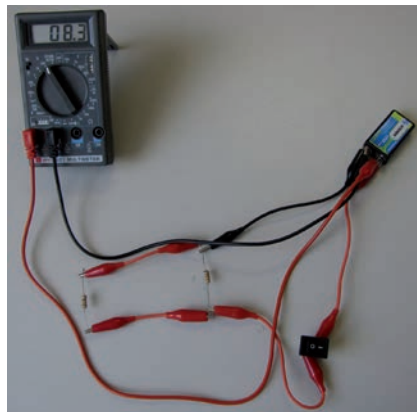
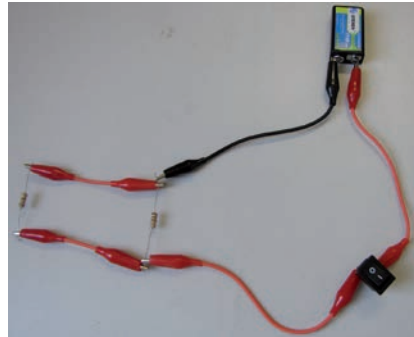
R (Ω)	R_1 (Ω)	R_2 (Ω)

¿Cómo están conectados los bombillos de una guirnalda de Navidad? ¿Por qué?

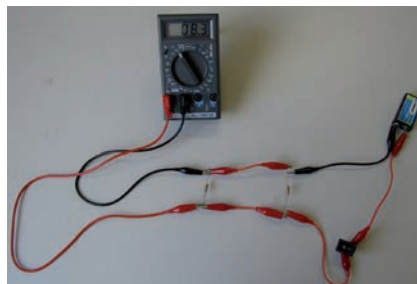
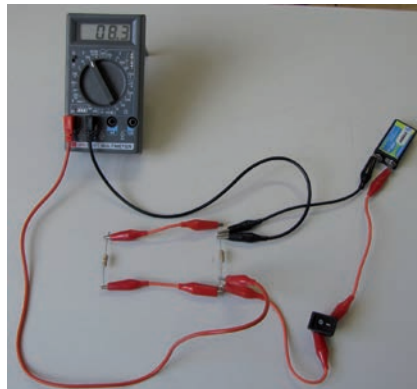


Conexión en paralelo.

5. Ahora dibuja el esquema del circuito con la fuente y el interruptor en serie pero los dos resistores en paralelo.



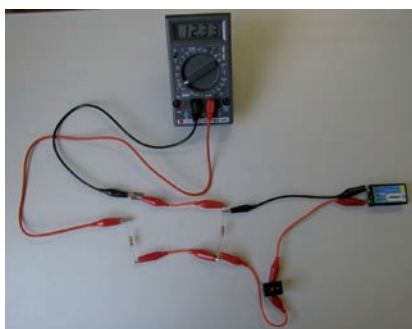
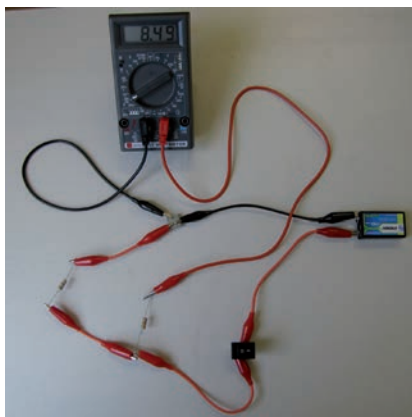
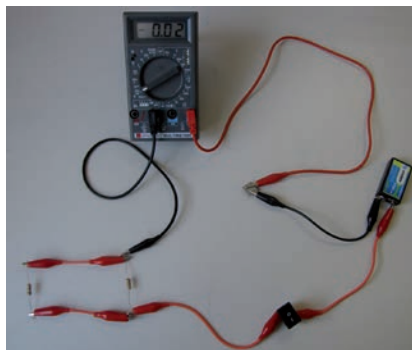
6. Realiza la conexión según el esquema y comprueba que el voltaje es el mismo al conectar directamente el voltímetro a los terminales de cada uno de los resistores y de la fuente.



$V(V)$	$V_1(V)$	$V_2(V)$



7. Intercala el amperímetro en el circuito y mide la intensidad de corriente en su parte no ramificada y en cada una de los resistores. Comprueba que $I = I_1 + I_2$.



$I \text{ (A)}$	$I_1 \text{ (A)}$	$I_2 \text{ (A)}$

8. A partir de los datos anteriores y utilizando la ley de Ohm, calcula la resistencia total del circuito (No es necesario calcular las resistencias de los resistores, pues ya lo has hecho en la actividad 4).

$R \text{ (}\Omega\text{)}$	$R_1 \text{ (}\Omega\text{)}$	$R_2 \text{ (}\Omega\text{)}$

9. Comprueba las siguientes ecuaciones:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

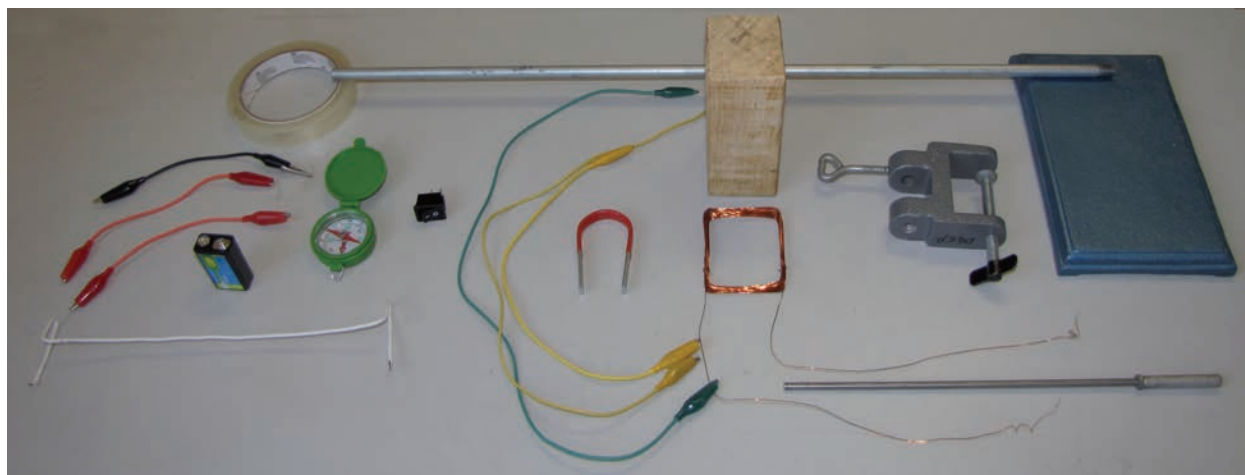
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

¿Cómo están conectados los consumidores de energía eléctrica en una casa? ¿Por qué?



5.2.6. Interacción de un campo magnético y un conductor con corriente: experimento de Oersted, fuerza de Ampere.

Materiales e instrumentos: fuente, bobina confeccionada enrollando 10-15 vueltas de alambre de cobre (con barniz aislante) sobre un molde, brújula, imán de herradura, soporte universal, prensa, varilla delgada para colgar la bobina, interruptor, cables de conexión.



En 1819, Hans Christian Oersted realizó el experimento que hoy lleva su nombre, el cual evidencia el efecto magnético de una corriente eléctrica. Este experimento mostró, por primera vez, que el magnetismo está estrechamente relacionado con la electricidad. Junto a los experimentos de inducción electromagnética realizados por Faraday, formó la base sobre la cual se erigió el electromagnetismo. Poco tiempo después del experimento de Oersted, en 1820, André Marie Ampere estableció la ley para la fuerza de interacción entre dos pequeñas porciones de conductores con corriente eléctrica (elementos de corriente). La fuerza sobre un conductor con corriente eléctrica debida a la acción de un campo magnético se conoce como fuerza de Ampere. Ella constituye el principio básico de funcionamiento de numerosos dispositivos, entre ellos, motores eléctricos y bocinas electrodinámicas.

El **objetivo** de la práctica es analizar una versión del experimento de Oersted, así como las características de la fuerza que actúa sobre un conductor con corriente eléctrica debido a la acción de un campo magnético.

Un estudio experimental cuantitativo de la fuerza de Ampere implica disponer de material que no siempre es de fácil acceso. Por eso, en esta práctica nos limitaremos a un análisis cualitativo.





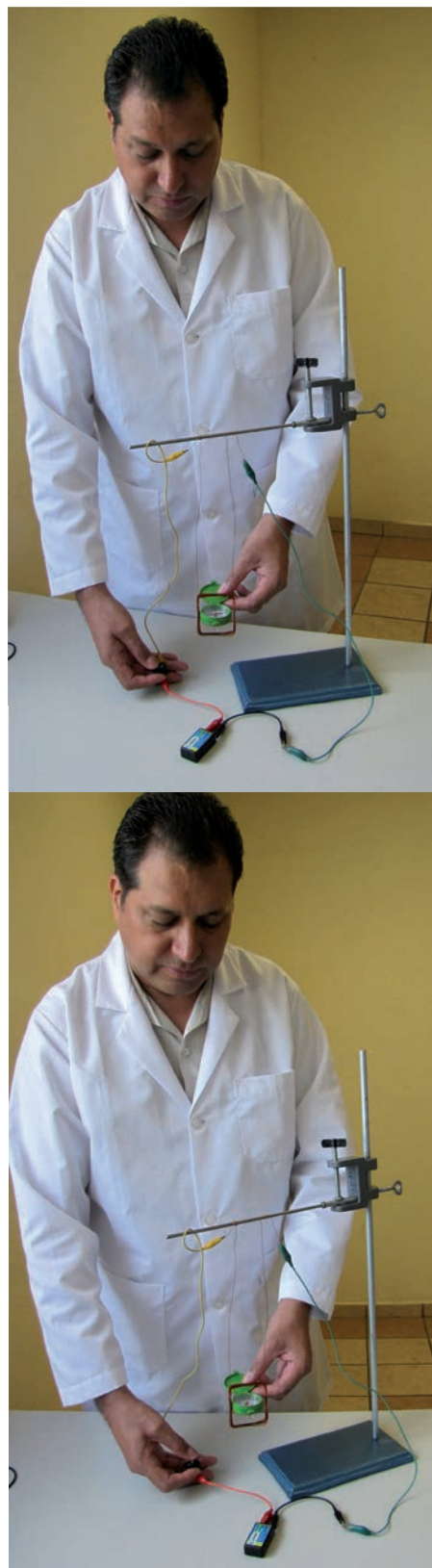
Experimento de Oersted.

1. Con ayuda del soporte universal y de la prensa, fija la varilla delgada en posición horizontal. Cuelga la bobina de la varilla, dando 2-3 vueltas a sus terminales alrededor de ella. Los terminales de la bobina deben ser de 15-20 cm de longitud. Conecta en serie la fuente, la bobina y el interruptor, manteniendo éste abierto. A partir del sentido que tendrá la corriente en la bobina, determina el sentido del campo magnético en su centro.
2. Sitúa el soporte universal de tal modo que el plano de la bobina sea paralelo a la aguja de la brújula orientada en el campo magnético de la Tierra. A continuación coloca la brújula en el centro de la bobina, cierra el interruptor por unos segundos y observa lo ocurrido.
3. Traza un esquema donde representes el vector campo magnético de la bobina y la componente horizontal del campo magnético de la Tierra, en el centro de la bobina. ¿Corresponde la desviación de la aguja con lo previsto en el esquema?

Imagina que se conociera el valor de la componente horizontal del campo magnético de la Tierra en el lugar del experimento, ¿cómo pudiera utilizarse dicho conocimiento para determinar el campo magnético originado por la bobina en su centro?

Repite la experiencia, invirtiendo la polaridad de la pila para cambiar el sentido de la corriente en la bobina. Explica lo ocurrido.

¿Qué argumento sugiere que la aguja magnética también debe actuar sobre la bobina, en otras palabras, sobre el conductor actúa una fuerza debida al campo magnético de la aguja?



Fuerza de Ampere.

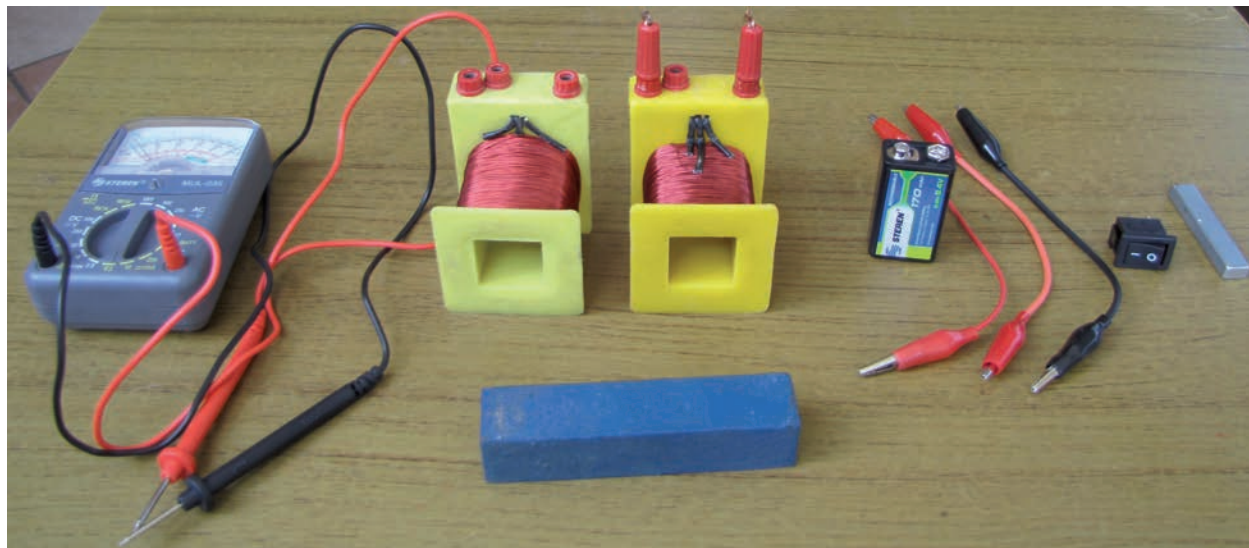
4. Introduce un rama del imán de herradura en la bobina, como se muestra en la foto, cierra el interruptor por unos segundos y observa el movimiento de la bobina.
5. Selecciona algunas posibles variantes de orientación del campo magnético del imán respecto a la bobina y, para cada una de ellas, traza un esquema que indique las direcciones y sentidos de: el vector campo magnético, la corriente eléctrica y la fuerza de Ampere.
6. Verifica en cada caso si la dirección y sentido de la fuerza es la prevista.





5.2.7. Estudio del fenómeno de inducción electromagnética.

Materiales e instrumentos: fuente, bobinas (2), núcleo de hierro para insertar en las bobinas, imán, interruptor, miliamperímetro (o galvanómetro), cables de conexión.



Mientras que el experimento de Oersted mostró el aspecto de la interrelación entre electricidad y magnetismo que va de la primera al segundo, los experimentos de inducción electromagnética realizados por Faraday en 1831, pusieron de manifiesto el aspecto de esa interrelación que va del magnetismo a la electricidad: un campo magnético variable produce un campo eléctrico, que puede originar corriente eléctrica en un conductor. Posteriormente, razonamientos teóricos llevaron a James C. Maxwell a la conclusión de que un campo magnético puede ser originado no solo por una corriente eléctrica, como en el experimento de Oersted, sino también por un campo eléctrico variable, completando con ello las ideas básicas del Electromagnetismo.

El **objetivo** de esta práctica es llevar a cabo y analizar una versión de los experimentos de Faraday.

Nos limitaremos a un análisis cualitativo.

1. Conecta el miliamperímetro a los terminales de una de las bobinas. A continuación introduce rápidamente uno de los polos del imán en la bobina y observa la indicación del miliamperímetro. También observa lo que ocurre al extraer el imán. Dibuja un esquema de la situación y explica lo sucedido utilizando los términos de flujo de campo magnético, fem, ley de Lenz.



2. Coloca la segunda bobina junto a la primera y conéctala en serie con la pila y el interruptor. Introduce el núcleo de hierro en las bobnias. Cierra y abre el circuito y observa la indicación del miliamperímetro. Dibuja un esquema de la situación y explica lo sucedido utilizando los términos de flujo de campo magnético, fem, ley de Lenz.



Bibliografía

Alvarado, A., Valdes, P. y Caro J. (2008). *Mecánica 1: Bachillerato universitario*. México: Once Ríos.

Alvarenga, B. y Máximo, A. (1998). *Física General con experimentos sencillos*. México: Oxford.

Giancoli, D. (2002). *Física: Principios con aplicaciones*. México: Prentice-Hall Hispanoamericana.

Haber-Schaim y otros (1975). *Física PSSC *. España: Reverté*.

Hecht, E. (1999). *Física en perspectivas*. México: Addison-Wesley Iberoamericana.

Hewitt, P. (1999). *Conceptos de Física*. México: Limusa.

Hewitt, P. (2004). *Física conceptual*. México: Pearson.

Holton, G. (1993). *Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas*. España: Reverté.

Microsoft (2008). *Encarta 2009 Biblioteca Premium DVD*.

Pérez, H. (2007). *Física General*. México: Patria.

Pople, S. (1997). *Física Razonada*. México: Trillas.

Resnick R. y otros. (2002). *Física*. Vol. 1. México: Continental.

Sears, F. y otros. (1999). *Física Universitaria*, Vol. 2. México: Pearson.

Serway y Beichner. (2001). *Física para ciencias e ingeniería* Tomo 1. México: McGraw Hill.

Serway y Faughn (2001). *Física*. México: Prentice Hall

Tipler, P. (1999). *Física para la ciencia y la tecnología*. Volumen 1. España: Editorial Reverté.

Tippens, P. (1996). *Física: Conceptos y Aplicaciones*. México: McGraw Hill.

Wik pedia, la enciclopedia de contenido libre.

Wilson, J. (1996). *Física*. México: Pearson.



ELECTROMAGNÉTISMO

Se terminó de imprimir en el mes de agosto de 2011
en los talleres gráficos de **Once Ríos Editores**,
Río Usumacinta 821, Col. Industrial Bravo, Culiacán, Sin.
Tel. 01(667)712-2650

Esta edición consta de 2,000 ejemplares